

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření ztrátových součinitelů kolen a redukcí

Measurement of Loss Coefficients of Elbows and Reductions

Student:

Pavel Czepczor

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Czepczor**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**
Téma: **Měření ztrátových součinitelů kolen a redukcí**
Measurement of Loss Coefficients of Elbows and Reductions
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teorii o měření místních ztrát v mechanice tekutin pro kolena a redukce. Popište principy používaných měřidel.
2. Popište měřicí trať, uveďte hydraulické schéma pro měření místních ztrát pro vybrané hydraulické prvky a metodiku měření.
3. Proveďte měření na laboratorním zařízení.
4. Vyhodnočte naměřená data graficky a porovnejte s literaturou.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257s. [cit. 2015-05-05]. ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [2] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL Praha, 1987. 354 s.
- [3] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.
- [4] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
- [5] JENČÍK, J., KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha: SNTL Praha, 1982. 580 s.
- [6] VINOPAL, S., KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha: SNTL Praha, 1963. 650 s.
- [7] MILLER, D. S. *International Flow systems*. Bedford: BHRA, 1990. 396 s. ISBN 0-947711-77-5.
- [8] ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. 1997.
- [9] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. 1996.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Mistopřísečné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2016


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 2. 2016


podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Czepezor

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Mosty u Jablunkova 1056
73998

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Czepczor, P. *Měření ztrátových součinitelů kolen a redukcí: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 55 s. Vedoucí práce: Jablonská, J.

Obsahem bakalářské práce je měření, vyhodnocení a porovnání místních ztrát tvořených prvky: kolena a redukce. Je zde popsána teorie ztrát v hydraulických obvodech a v praktické části celkové vyhodnocení naměřených hodnot. Teorie se zabývá vznikem místní ztráty a jejím výpočtem, stanovuje prvky měřicího obvodu a popisuje teorii měření tlaku a průtoku. Praktická část obsahuje popis měřicího obvodu a postup měření, výpočet jednotlivých charakteristických veličin, následné vyhodnocení a srovnání naměřených a vypočtených hodnot. Tyto údaje jsou porovnány s katalogovými hodnotami nebo s literaturou.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Czepczor, P. *Measurement of Loss Coefficients of Elbows and Reductions: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB- Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2016, 55 s. Thesis head: Jablonská, J.

The content of the bachelor thesis is the measurement, evaluation and comparison of local losses made up of elements: elbows and reductions. There are elaborated the theory of local losses and in the practical part overall values evaluation. Theory deals with the origins of local losses and the calculation, its determine the measuring of circuit elements and discusses the theory of measurement of pressure and flow. The practical part contains a description of the measuring circuit and the process of measuring, calculating individual characteristic variables, subsequent valuation of the measured and calculated values. Data are compared with catalogue values or literature.

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitého značení..... | 8 |
| Úvod..... | 9 |
| 1 Hydraulické odpory (ztráty) | 10 |
| 1.1 Hydraulický výpočet potrubí..... | 10 |
| 1.2 Třecí odpory | 12 |
| 1.3 Místní odpory: | 13 |
| 1.4 Místní ztráta ve změně průřezu | 14 |
| 1.6 Místní ztráta ve změně směru proudění | 19 |
| 1.7 Ztráty celkové: | 21 |
| 2 Měřicí zařízení..... | 22 |
| 2.1 Měření tlaku | 22 |
| 2.2 Měření průtoku..... | 25 |
| 3 Měření místních ztrát na vodní trati | 28 |
| 3.1 Experimentální obvod | 28 |
| 3.3 Postup měření..... | 32 |
| 3.4 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení - kolena | 33 |
| 3.5 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení- zúžení | 38 |
| 3.6 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení- rozšíření..... | 40 |
| 4 Závěr..... | 47 |
| 5 Literatura | 48 |
| Seznam příloh | 50 |

Seznam použitého značení

| Značka | Název | Jednotka |
|-------------------|---|------------------------------------|
| d_1 | průměr potrubí (pro vstupní rychlost) | [m] |
| d_2 | průměr potrubí (pro výstupní rychlost) | [m] |
| v_1 | rychlost kapaliny (vyšší) | [m.s ⁻¹] |
| v_2 | rychlost kapaliny (nižší) | [m.s ⁻¹] |
| Δh | rozdíl výšek na U-trubici | [m] |
| e_z | ztrátová energie | [J.kg ⁻¹] |
| ζ_c | ztrátový součinitel celkový | [1] |
| ζ_M | ztrátový součinitel místní | [1] |
| ζ_T | ztrátový součinitel třecí | [1] |
| Re | Reynoldsovo číslo | [1] |
| ν | kinematická viskozita | [m ² .s ⁻¹] |
| λ_1 | třecí součinitel pro rychlost v_1 | [1] |
| λ_2 | třecí součinitel pro rychlost v_2 | [1] |
| l_1 | vzdálenost odběrného místa pro rychlost v_1 | [m] |
| l_2 | vzdálenost odběrného místa pro rychlost v_2 | [m] |
| ζ_1 | ztrátový součinitel pro vstupní rychlost | [1] |
| ζ_2 | ztrátový součinitel pro výstupní rychlost | [1] |
| Q_v | objemový průtok | [m ³ .s ⁻¹] |
| Δp_m | tlaková difference vzniklá místní ztrátou | [Pa] |
| Δp_{stat} | tlaková difference měřená | [Pa] |
| Δp_{DYN} | tlaková ztráta dynamická celková | [Pa] |
| Δp_{DYN1} | tlaková ztráta dynamická pro rychlost v_1 | [Pa] |
| Δp_{DYN2} | tlaková ztráta dynamická pro rychlost v_2 | [Pa] |
| $\Delta p_{tř}$ | tlaková ztráta třecí celková | [Pa] |
| $\Delta p_{tř1}$ | tlaková ztráta třecí pro rychlost v_1 | [Pa] |
| $\Delta p_{tř2}$ | tlaková ztráta třecí pro rychlost v_2 | [Pa] |
| S_1 | průřez potrubí světlosti d_1 | [m ²] |
| S_2 | průřez potrubí světlosti d_2 | [m ²] |

1 Pozn: Jednotky uvedených fyzikálních veličin jsou základní. V práci jsou uvedeny i jiné rozměry těchto veličin.

Úvod

Obsahem této bakalářské práce je teorie o místních ztrátách a druhy měření těchto ztrát, dále popis postupu měření a výpočtů ztrátových součinitelů na prvcích typu: koleno, zúžení a rozšíření.

Samotné měření probíhalo ve školní laboratoři na námi složených tratích. Následné vyhodnocení naměřených dat formou výpočtů a uvedení do grafů je účelem této práce. Cílem je porovnání charakteristik těchto prvků za účelem dimenzování potrubí. Z důvodu návrhu celkového tlakového spádu obvodu je nezbytné počítat s pravými hodnotami ztrátových součinitelů. Při špatném návrhu obvodu může dojít k předdimenzování nebo poddimenzování obvodu.

Počátkem práce je rozbor teoretické části týkající se hydraulických ztrát v potrubí tzn. místní a třecí ztráty. Teorie o místních ztrátách je zde uvedena obsáhleji než teorie o ztrátách třecích, jelikož při samotném měření uvedených prvků mají třecí ztráty zanedbatelný dopad na tlakový spád obvodu.

Měření v laboratoři probíhalo na tratích složených přímo pro jeden měřený prvek. Tento postup byl zvolen pro jednoduchost a přesnost měření. Vzdálenost odběrných míst před a za prvkem byla volena podle normy, aby se eliminovalo zkreslení měření důsledkem neustáleného proudění kapaliny před a za prvkem.

Z Bernoulliho rovnice byl odvozen výpočet pro určení ztrátového součinitele redukce, s uvažováním vlivu třecí ztráty a změny kinetické energie. Z obecných vzorců pro mechaniku tekutin byl odvozen výpočet ztrátového součinitele místní ztráty způsobenou změnou směru proudění.

Vypočtené výsledky jsem porovnal a vyhodnotil formou tabulek a grafů s hodnotami uvedenými v různých literaturách a katalozích.

1 Hydraulické odpory (ztráty)

Hydraulické ztráty vznikají při proudění skutečné kapaliny potrubím. Hydraulické odpory jsou všechny prvky vedení, které způsobují rozptyl energie. Tento rozptyl se projevuje jako tlakový úbytek, úbytek kinetické energie nebo snížení polohové energie. [1]

Hydraulické odpory se dělí na:

- **Třecí odpory** vznikají především třením o stěny potrubí a vnitřním třením v kapalině. Jsou charakteristické v místech, kde závisí na délce potrubí, jsou tedy úměrné délce potrubí.
- **Místní odpory** vznikají v místech, kde se mění velikost rychlosti vlivem změny průtočného průřezu (např.: redukce), směr rychlosti vlivem zakřivení potrubí (např.: kolena), popřípadě velikost i směr rychlosti (např.: armatury). Dochází přitom k odtržení proudu kapaliny od stěn prvku a vzniku vířivé oblasti.

V této práci se budu zabývat především místními ztrátami, avšak ve výpočtech je třeba uvažovat i se ztrátami třecími.

1.1 Hydraulický výpočet potrubí

Hydraulický výpočet potrubí je založen na aplikaci rovnice kontinuity, Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu na určení hydraulických odporů. Při proudění skutečných tekutin se uvažují hydraulické odpory, tj. síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Mechanismus hydraulických odporů je složitý jev, který se dosud nepodařilo exaktně vyřešit, až na jednodušší případy laminárního proudění. Proto se v hydraulických výpočtech uplatňuje řada poloempirických metod. [3]

Pokud by v potrubí proudila ideální (neviskózní) tekutina o tlaku p a rychlosti v , tak by byla zachována konstantní celková energie v kterémkoliv místě po celé jeho délce dle Bernoulliho rovnice.

Protože ideální tekutina neexistuje, každá tekutina vykazuje jistou míru vnitřního tření, tak proudění skutečné tekutiny provází energetické ztráty. Pro skutečnou kapalinu tedy platí:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + e_z \quad 1-1$$

$$\frac{p}{\rho} \quad \text{měrná tlaková energie} \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

$$\frac{v^2}{2} \quad \text{měrná pohybová energie} \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

$$g \cdot h \quad \text{měrná polohová energie} \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

$$e_z \quad \text{ztrátová energie} \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

Ztrátu energie při proudění skutečné kapaliny způsobují síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Ztrátovou energii je možno vyjádřit pomocí ztráty, ztrátové výšky a celkového ztrátového součinitele dle vztahu 1-2:

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta_c \cdot \frac{v^2}{2} \quad 1-2$$

Kde celkový ztrátový součinitel lze určit jako součet ztrát místních a ztrát třecích viz 1-3.

$$\zeta_c = \zeta_M + \zeta_T \quad 1-3$$

Kde:

$$\zeta_M \quad \text{ztrátový součinitel místní}$$

$$\zeta_T \quad \text{ztrátový součinitel třecí}$$

1.2 Třecí odpory

Ztráta energie způsobená třením tekutiny o stěny vedení, závisí na typu proudění a tvaru daného potrubí (průměr, délka, drsnost, materiál, stav potrubí tj. staré, nové). Třecí ztráty jsou definovány tzv. součinitelem tření λ , který je závislý na režimu proudění, který vyjadřuje Reynoldsovo číslo. Mezní hodnotou režimu proudění je 2320 (Re_k), kdy hodnoty Re dosažené pod tuto mez znamenají režim proudění laminární v opačném případě režim turbulentní.

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad 1-4$$

Součinitel tření je také závislý na poměrné relativní drsnosti ε .

Relativní drsnost je definována vztahem:

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad 1-5$$

k [mm] – střední drsnost stěny potrubí,

Rozptýlená ztrátová energie vyjadřující třecí ztráty je definována:

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta_T \cdot \frac{v^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad 1-6$$

Kde $\zeta_T = \lambda \cdot \frac{l}{d}$

Existuje celá řada výpočtů součinitele tření λ , které lze najít např. v literatuře [1,2,4]

Nejčastěji používaný vzorec pro výpočet součinitele tření při laminárním proudění:

$$\lambda = \frac{A}{Re} \quad 1-7$$

Kde A je konstanta závislá na průřezu potrubí. Pro kruhový průřez $A=64$.

Pro výpočet součinitele tření u turbulentního proudění lze použít celou řadu vzorců, jak je uvedeno v literatuře [1, 2, 4]. Nejčastěji používaným vzorcem z důvodu jednoduchosti je Blasiusův vztah. Pro přesnější výpočty je možno použít vztahy jiných autorů.

| Hladké potrubí | | | |
|-----------------------|---|----------------------------------|-----|
| Autor | Vztah | Platnost | |
| Blasius | $\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$ | $Re_k \leq Re \leq 8 \cdot 10^4$ | 1-8 |
| Nikuradse | $\lambda = \frac{1}{[2 \log(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8]^2}$ | $Re > 6 \cdot 10^4$ | 1-9 |

Tabulka 1-1

Pro drsné potrubí viz Tabulka 1-2

| Drsné potrubí | | | |
|------------------------|---|---|------|
| Autor | Vztah | Platnost | |
| Nikuradse | $\lambda = \frac{1}{[2 \log \cdot \frac{d}{k} + 1,138]^2}$ | $\frac{k}{d} Re \sqrt{\lambda} > 191,2$ | 1-10 |
| Altšula | $\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25}$ | | 1-11 |
| Colebrook-White | $\lambda = \frac{1}{[2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) + 0,27 \frac{k}{d}]^2}$ | | 1-12 |

Tabulka 1-2

1.3 Místní odpory:

Energie rozptýlená v místních ztrátách bývá několikrát větší než rozptýlená energie způsobená třením.

Velikost místních ztrát, tj. ztrátová energie při místních ztrátách se vyjadřuje rychlostní výškou a ztrátovým součinitelem.

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta_M \cdot \frac{v^2}{2} \quad 1-13$$

$$\zeta_M = \frac{2 \cdot h_z \cdot g}{v^2} = \frac{2 \cdot p_z}{\rho \cdot v^2} \quad 1-14$$

Hodnota ztrátového součinitele ζ_M je závislá na druhu místní ztráty, konstrukčních parametrech, drsnosti stěn, tvaru rychlostního profilu, a režimu proudění tzn. velikost Reynoldsova čísla. Vliv Reynoldsova čísla se projevuje především při jeho nízkých hodnotách. Pokud uvažujeme vysoké hodnoty Reynoldsova čísla ($Re \geq 10^5$), pak součinitel místních ztrát je téměř konstantní.

Teoretické určení ztrátového součinitele je krom jednoduchých případů nemožné. Za těchto okolností se součinitel místních ztrát určuje experimentálně, pak platí pouze v podmínkách, ve kterých byl zjištěn. [2]

Místní odpory v potrubí je možné nahradit ekvivalentní délkou potrubí l_e , která tak definuje místní ztrátu přímoúměrně ztrátě třecí.

$$\zeta_M \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \rightarrow l_e = \frac{\zeta_M}{\lambda} \cdot d \quad 1-15$$

Pro součinitel tření λ a průměr platí hodnoty pro rovný úsek potrubí. V následující kapitole budou popsány měřené místní ztráty.

1.4 Místní ztráta ve změně průřezu

Změny průřezu potrubí můžeme rozdělit dle toho, zda je změna průřezu náhlá nebo pozvolná tj. s jakousi postupnou změnou z jednoho průměru na druhý. Náhlá změna je koncipována v jednom místě potrubí, kdy se z průměru prvního změní okamžitě na druhý. Tyto dva průměry můžou být situovány v jedné nebo každý ve své ose. Rozlišujeme rozšíření (Obrázek 1.2) nebo zúžení (Obrázek 1.1).

Pozvolná změna velikosti průřezu je taková, kdy na určité délce jeden průměr pozvolně přechází v druhý. Takové zúžení nazýváme konfuzor naopak rozšíření difuzor Obrázek 1.3.

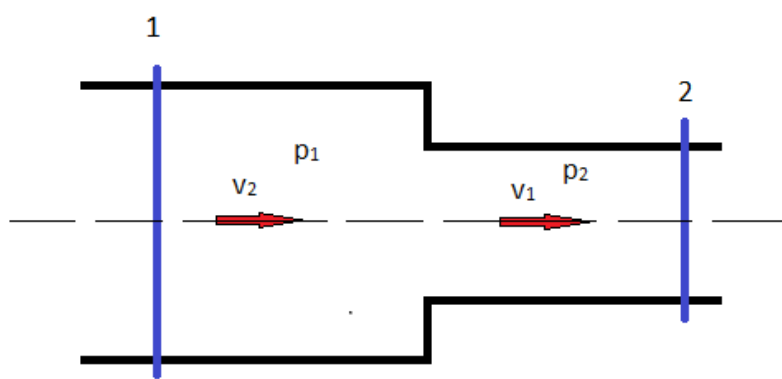
V těchto částech potrubí vzniká místní odpor, mění se rychlost proudění kapaliny.

Náhlé zúžení

Při náhlém zúžení vznikají vířivé oblasti před zúžením, ale také vlivem setrvačnosti vznikají víry i za změnou průřezu, dochází k odtržení proudu kapaliny od stěn potrubí. Rychlost proudění kapaliny se zvýší.

Bernoulliho rovnici určí dle Obrázek 1.2 pro průřezy (1-2) tj. těsně před zúžením a ve vzdálenosti za prvkem, kde je proudění ustáleno. Hladina nulového potenciálu je v ose prvku

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + e_z \quad 1-16$$



Obrázek 1.1 Zúžení

Ztrátový součinitel pro přítokovou rychlost v_1 :

$$\zeta_1 = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad 1-17$$

Ztrátový součinitel pro odtokovou rychlost v_2 :

$$\zeta_2 = 1 - \frac{S_2}{S_1} \quad 1-18$$

Odvození výpočtu pro zúžení

Základní tvar Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + e_z \quad 1-19$$

Dosazení konkrétních tlaků:

$$p_1 + \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho = p_2 + \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho (\Delta p_{tř} + \Delta p_m) \quad 1-20$$

Odvození celkové ztráty redukce Δp_m :

$$\Delta p_m = (p_1 - p_2) + \left\{ \rho \cdot \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) \right\} - (p_{tř1} + p_{tř2}) \quad 1-21$$

Pojmenování jednotlivých druhů ztrát:

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| Δp_m | tlaková ztráta celková místní |
| Δp_{stat} | tlaková ztráta statická místní |
| Δp_{DYN} | tlaková ztráta dynamická místní |
| $\Delta p_{tř}$ | tlaková ztráta třecí |

$$\Delta p_m = \Delta p_{stat} + (p_{DYN2} - p_{DYN1}) - \Delta p_{tř} \quad 1-22$$

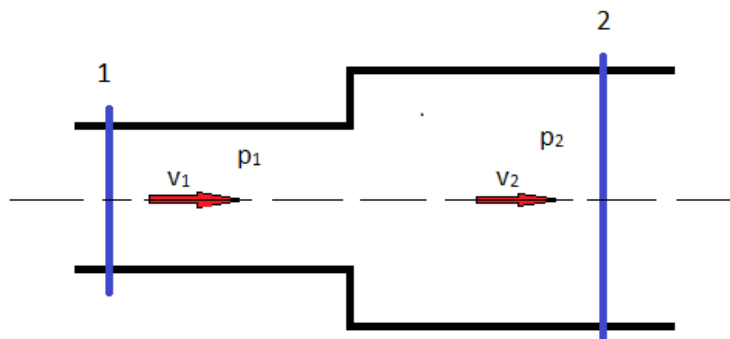
Výpočet součinitele místní ztráty

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p_m}{\rho \cdot v^2} \quad 1-23$$

Součinitel místní ztráty se pro redukce určuje pro rychlosti jak vstupní tak výstupní.

Náhlé rozšíření

Náhlé rozšíření způsobuje odtrhnutí proudu kapaliny od stěny potrubí, vznik vírů, které postupně zaniknou. Střední rychlost proudění se zmenší a následně tlak kapaliny vlivem zvětšení průřezu stoupne.



Obrázek 1.2 Rozšíření

Vlivem změny hybnosti kapaliny byl odvozen tzv. Bordův (Carnotův) vzorec pro výpočet ztrátového součinitele náhlého rozšíření pro průtokovou rychlost v_1 (ztrátový součinitel označený ζ_1) a pro odtokovou rychlost v_2 (ζ_2)

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^2 \quad 1-24$$

$$\zeta_2 = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 = \left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 - 1\right]^2 \quad 1-25$$

Ztráta náhlým rozšířením průřezu je způsobena víry v oblasti mezi odtrženou proudnicí a stěnami.

Odvození výpočtu pro rozšíření:

Výpočet probíhá obdobně jako u výpočtu pro zúžení. Rozdíl je ve výpočtu tlakové ztráty dynamické, kdy na základě odlišného značení rychlostí vypočteme tuto veličinu podle rovnice 1-26.

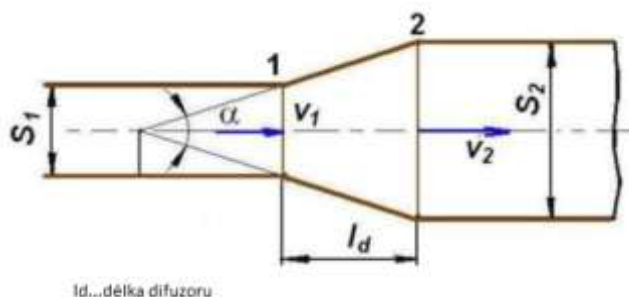
$$\Delta p_m = \Delta p_{stat} + (p_{DYN1} - p_{DYN2}) - \Delta p_{tř} \quad 1-26$$

Ztráta v difuzoru

Při ztrátě náhlým rozšířením bylo dokázáno, že dochází ke značným ztrátám způsobeným odtržením proudu a vířením. Ztráty mohou být podstatně zmenšeny, jestliže přechod z menšího průřezu na větší bude pozvolný, jak je tomu u difuzoru. Difuzor se používá hlavně tam, kde je třeba přeměnit kinetickou energii proudu na tlakovou (u podzvukových rychlostí) s nejmenšími ztrátami. Je známo, že velmi malým rozšířením průřezu se mění znatelně proudění, a to zejména rychlostní profil, který je tím více protažen ve směru proudění, čím je úhel rozšíření větší. Do úhlu rozšíření $\alpha=6^\circ-8^\circ$ zůstává protažený rychlostní profil symetrický k ose difuzoru. Při dalším zvětšení úhlu se proud účinkem tlakového gradientu odtrhne od stěny a symetrie proudu se poruší.

Při úhlech rozšíření $\alpha=10^\circ-50^\circ$ nastává odtržení proudu zpravidla od jedné stěny, na níž je rychlost menší. Proto nemůže dojít k odtržení proudu na protější stěně. Rychlostní profil se stane nesymetrickým. Nesouměrnost proudu je často doprovázena nestabilním odtrháváním, což vyvolá kmitání proudu (pulsace) a tvoření vírů.

V difuzorech s většími úhly rozšíření než $50^\circ-60^\circ$ nemůže proud sledovat stěny difuzoru a odtrhává se po celém průřezu. Odtrhávání od stěny je doprovázeno menšími pulsacemi proudu. V rozšiřující se troubě nebo kanále vzrůstá smykové napětí následkem zvýšení turbulence, což způsobuje zvýšení ztrát. Rovněž pulsace přispívají ke zvýšení ztrát. Nastává-li odtržení proudu v difuzoru, jsou ztráty způsobeny převážně vzniklými víry. Všechny ztráty mohou doprovázet ztrátu třením v difuzoru. Celkové ztráty v difuzoru je možno rozepsat na ztrátu třením a ztrátu spojenou se změnou průřezu, takže $h_{zd}=h_{zt}+h_{zr}$.



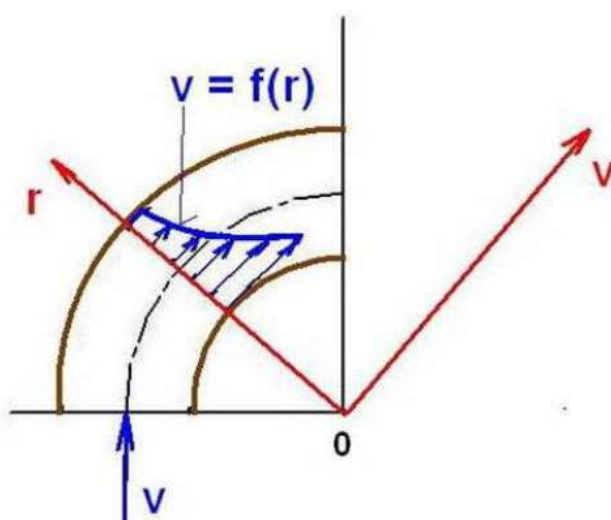
Obrázek 1.3 Difuzor [4]

1.6 Místní ztráta ve změně směru proudění

V téměř každém potrubí se vyskytují prvky, ve kterých se mění směr rychlosti. Patří mezi ně různá kolena, oblouky či jinak zakřivené části potrubí. V tomto zakřivení působí na proud kapaliny odstředivá síla.

Příčiny ztrát v zakřivených částech

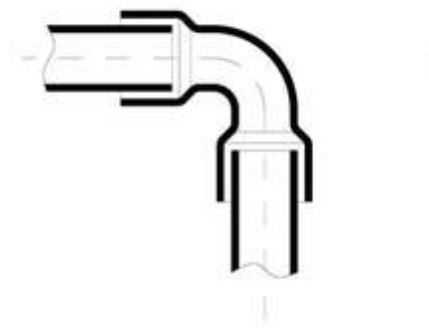
Prouděním kapaliny v zakřivené části potrubí vzniká odstředivá síla. Ta způsobuje zvýšení tlaku na vnější stěně. Rychlost proudění roste od vnější stěny k vnitřní viz Obrázek 1.4.



Obrázek 1.4 Rychlostní profil v oblouku (kolenu) [4]

Příčinou tření v obloucích je výroba těchto prvků. Druh výroby a materiál určuje kvalitu vnitřních stěn potrubí a strukturu povrchu. Při ohybech tvářených za tepla se deformuje vnitřní strana oblouku, materiál se zde hromadí a nepříznivě brání tekutině v jejím pohybu. Naopak při výrobě tvarovek odléváním se dosahuje daleko lepším výsledkům. Tento typ výroby je výhodnější a u materiálu PVC základní. Dosahuje se velice dobré kvality za příznivou cenu. Výrobky jsou přesné a jejich využití zejména v domácnostech je široké.

Konstrukce kolen použitých v této práci:



Obrázek 1.5 Měřený typ kolena [9]

Tvarovka (koleno) konstruována s větším vnitřním průměrem nasouvacího hrdla než je vnější průměr trubky (trubka se vsouvá do kolena). Následná funkční část kolena má stejný vnitřní průměr jako u potrubí. Tato konstrukce vykazuje menší místní ztráty než konstrukce opačná (větší vnitřní průměr trubky než je vnější průměr hrdla kolena), trubka se nasouvá na koleno.

Postup výpočtu místní ztráty ζ

Prvním bodem výpočtu je výpočet rychlosti proudění:

$$v = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} \quad 1-27$$

Určení typu proudění dle Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad 1-28$$

kde $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Určení tlakové ztráty :

$$\Delta p_m = \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad 1-29$$

kde $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$

Určení součinitele místní ztráty:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p_m}{\rho \cdot v^2} \quad 1-30$$

1.7 Ztráty celkové:

Pokud se v potrubí nacházejí prvky vykazující oba dva typy odporů, dá se odvodit celková energetická ztráta:

$$e_{zc} = \frac{v^2}{2} \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta_i \right) \quad 1-31$$

Místní ztráty převedené na ztráty třením vyjádřené ekvivalentní délkou:

$$l_e = \frac{\zeta \cdot d}{\lambda} \quad 1-32$$

Celkový součinitel místní ztráty ζ_c :

$$\zeta_c = \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \quad 1-33$$

2 Měřicí zařízení

V experimentálním měření bylo nutné měřit tlak a průtok.

2.1 Měření tlaku

Při měření tlaku je tlak p definovaný pomocí hydrostatického sloupce kapaliny o hustotě ρ a výšce h (g je gravitační zrychlení)

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad 2-1$$

Jednotkou tlaku v soustavě SI je pascal (Pa). Tlak, který vyvolá síla jednoho newtonu rovnoměrně rozložená na ploše 1 m^2 , kolmé ke směru síly. Pascal je velmi malou jednotkou, v hydraulické praxi se používá jeho násobků kPa a MPa nebo je povoleno používat i jednotku bar ($1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$). Hodnotu tlaku udáváme obvykle vztaženou vůči dvěma základním hodnotám. Hodnota vztažená k vakuu je absolutním tlakem nebo k barometrickému tlaku (tlak vzduchu v daném místě), popřípadě měříme rozdíl (diferenci) tlaků. Hodnotám porovnávaným k barometrickému tlaku říkáme přetlak a podtlak.

Nejčastějšími měřidly používanými v laboratořích jsou tlakoměry kapalinné a tlakoměry založené na deformačním principu. Existuje celá řada měřidel tlaku. V experimentálním měření byly použity dva typy měřidel.

Pro měření tlakových diferencí jsem používal měřidla:

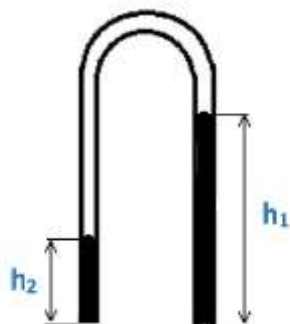
1. Založená na indukčním principu
2. Tlakoměr založený na principu obrácené U-trubice

Deformační tlakoměry

Princip je založen na pružné deformaci, neboli změně geometrického tvaru určitého tlakoměrného prvku působením měřeného tlaku. Tímto prvkem může být Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec.

Tlakovoměry kapalinové

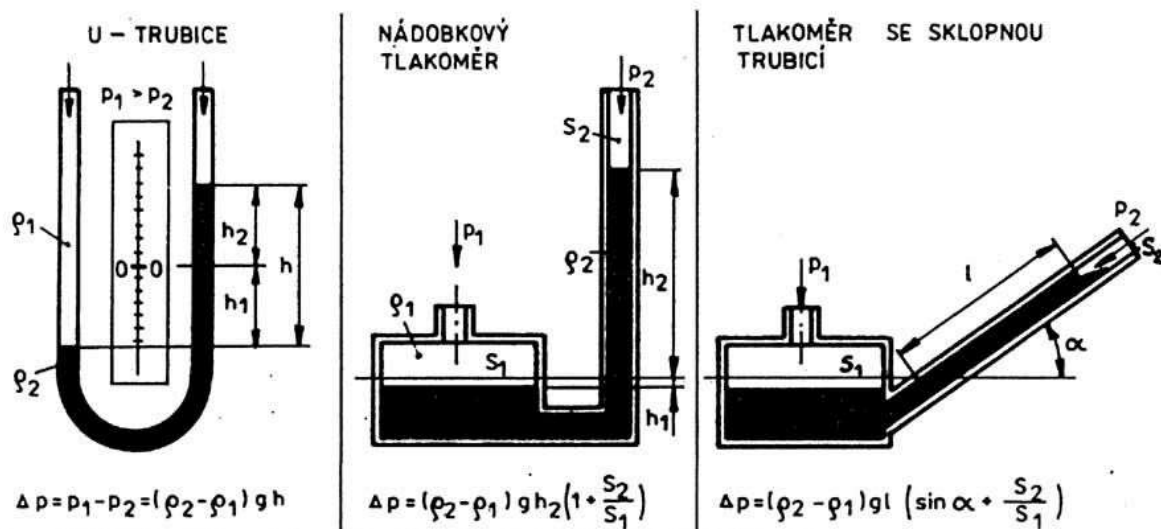
Pro svoji jednoduchost, cenovou dostupnost a přesnost patří mezi nejpoužívanější přístroje pro měření malých tlaků. Měřítkem tlakové difference je změna výšky tlakoměrné kapaliny, obvykle v přímé trubici. Pro měření bylo použito obrácené U-trubice.



Obrázek 2.1 Obrácená U - trubice

Výpočet tlakové difference:

$$\Delta p_{stat} = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad 2-2$$



Obrázek 2.2 Trubicové tlakoměry [6]

Snímače tlaku s elektrickým výstupem

Převod signálu deformačního prvku na elektrický signál. Základem elektrických snímačů je deformační prvek (membrána, trubice, vlnovec, krabice, nosník). Výstup následně zajišťuje senzor s elektrickým výstupem (sekundární senzor), který měří deformaci způsobenou měřeným tlakem. Vyhodnocení působení tlakové síly zajišťuje změna polohy nebo změna mechanického napětí. Převod na elektrický signál vyhodnocují:

- senzory polohy (potenciometrické, indukční, kapacitní, optické)
- senzory mechanického napětí (tenzometrické, rezonanční, piezoelektrické). [10]

Tlakoměry s potenciometrickým senzorem polohy

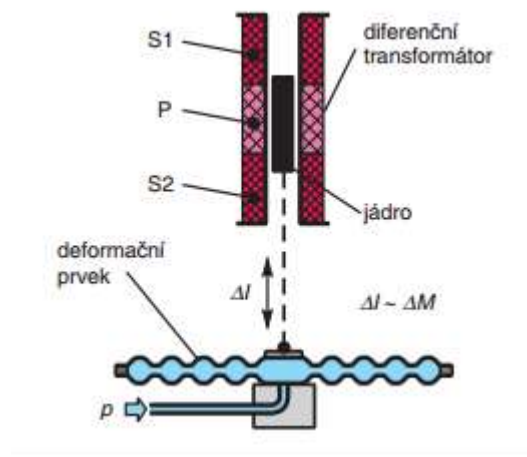
Jezdec potenciometru (odporový vysílač) je mechanicky spojen s deformačním prvkem, jehož deformace vyvolává změnu polohy jezdce (Δl), která se vyhodnocuje jako změna odporu (ΔR)

Kapacitní snímače tlaku

Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou, jejíž poloha se mění při působení tlaku. Změna vzdálenosti elektrod kondenzátoru se projeví změnou jeho kapacity.

Změnu tlaku vyvolá prostřednictvím vhodného pružného členu změnu polohy Δl feromagnetického jádra diferenčního transformátoru, což způsobí změnu vzájemné indukčnosti ΔM mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru. Při napájení primární cívkou P střídavým napětím je změna napětí na sekundárních vinutích $S1$ a $S2$ přímo úměrná Δl . Příklad deformačního tlakoměru s indukčním senzorem polohy a s analogovým elektrickým výstupem je na Obrázek 2.3. [10]

Tento typ snímače byl použit pro měření tlakových diferencí na zadaných prvcích.



Obrázek 2.3 Princip indukčního snímače [10]

Snímače tlaku s odporovými tenzometry

Odporový tenzometr je senzor, u něhož dochází ke změně elektrického odporu při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací. [6]

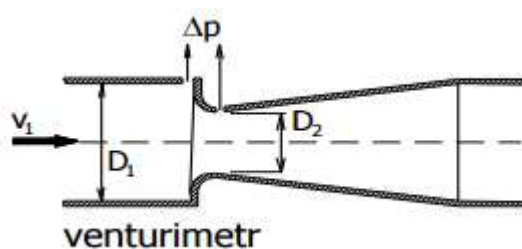
2.2 Měření průtoku

Pro určení charakteristik měřených prvků je třeba stanovit průtok, který je definován objemem protečeným daným průřezem za jednotku času nebo součinem průtočné plochy a střední rychlosti proudění.

Principy měření- měřidla průtoku

Trubní průtokoměry založené na zúžení proudu

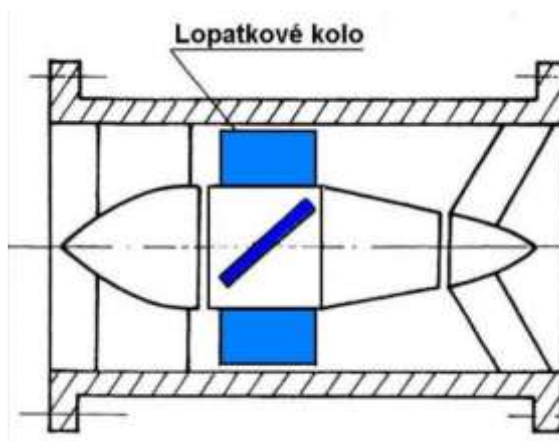
Průtokoměry založené na zúžení proudu a snímání difference tlaku jsou nejjednodušší. Patří zde clona, dýza a Venturiho trubice.



Obrázek 2.4 Venturimetr [11]

Rychlostní průtokoměry

Základním prvkem rychlostních průtokoměrů (motorická měřidla) je lopatkové kolo, uváděné do rotačního pohybu kinetickou energií proudící kapaliny.



Obrázek 2.5 Rychlostní průtokoměr [5]

Žárový anemometr

Měření rychlosti žárovým anemometrem je založeno na poznatku, že protékající kapalinou dochází z elektricky ohřívaného čidla (žhavený drátek nebo fólie) k odvodu tepla, jehož velikost je měřítkem rychlosti.

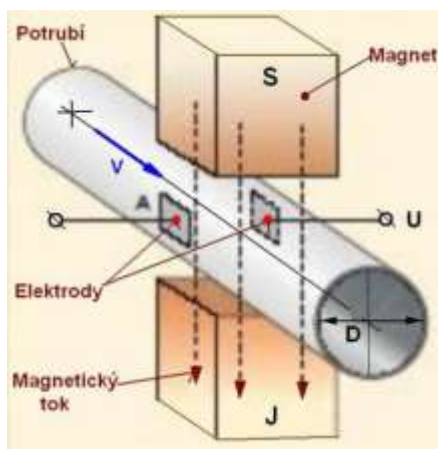
Nezatížený hydromotor

Nezatížený hydromotor je u hydraulických mechanismů často používaný způsob měření průtoku, hlavně pro svoji jednoduchost a spolehlivost. Měření průtoku tímto způsobem je převedeno na měření otáček nezatíženého hydromotoru. K měření otáček je možné použít fotosnímače s čítačem nebo tachodynamo.

Indukční průtokoměr

Indukční průtokoměry měří průtok v elektricky vodivých kapalinách. Využívají principu elektromagnetické indukce (Faradayova zákona). Proudící kapalina představuje vodič pohybující se v magnetickém poli. Indukované napětí U se snímá dvěma protilehlými elektrodami ve vzdálenosti l od sebe a umístěnými na vnitřní stěně trubky tak, aby mezi nimi procházel magnetický tok (kolmo na siločáry) Obrázek 2.6. U elektromagnetického

průtokoměru se indukuje elektromagnetické napětí ve vodiči kolmém na rovinu vytvořenou vektorem rychlosti vodivého média a vektorem magnetické indukce B . [11]

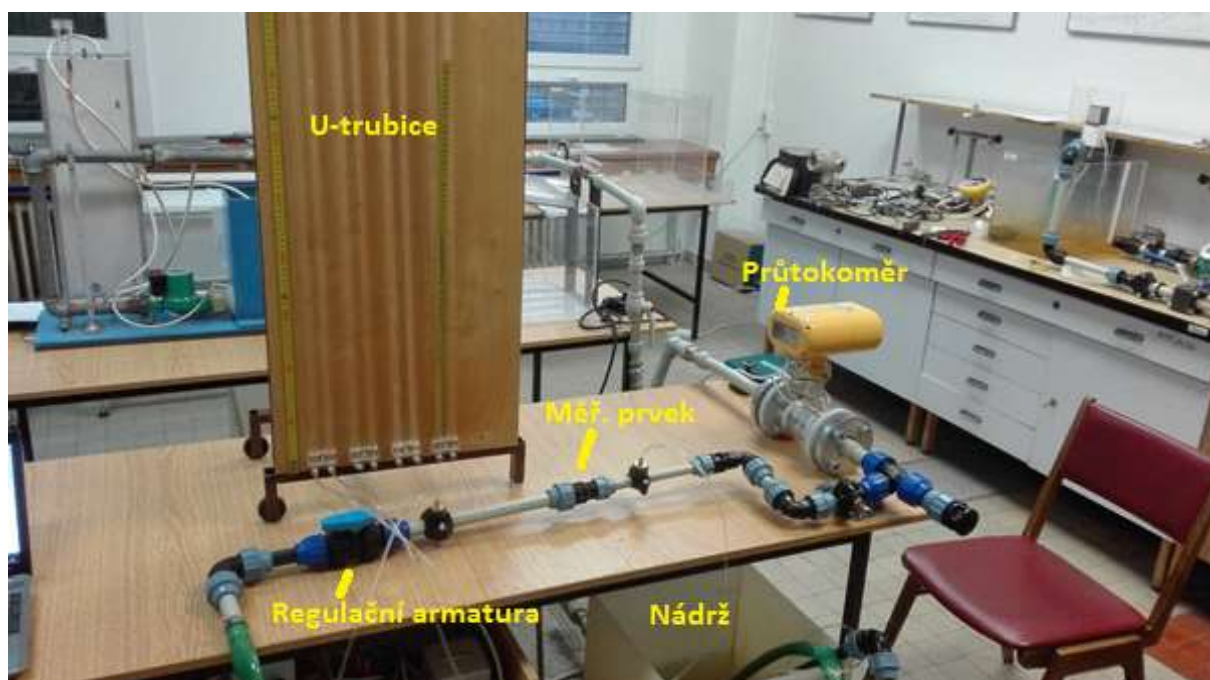


Obrázek 2.6 Indukční průtokoměr [11]

3 Měření místních ztrát na vodní trati

Měření místních ztrát probíhalo ve školní laboratoři na obvodech popsaných níže. Práce jako montáž a postup měření byly prováděny podle příslušných návodů. Odběrná místa byla volena na základě normy pro měření daných prvků.

3.1 Experimentální obvod



Obrázek 3.1 Měřený obvod

Měřená vodní trať je složena částečně z potrubí výrobce Wavin Ekoplastik používaného pro rozvod vody v domech. Z větší části je trať složená z nízkonákladových trubek, prvků a armatur výrobce Unidelta. Tyto prvky lze použít pro průmyslové rozvody s nízkým pracovním tlakem. Montáž je jednoduchá. Na prvcích dochází k úbytku energie důsledkem místních ztrát. Pro charakteristiky těchto ztrát jsem měřil tlakové difference na těchto prvcích:

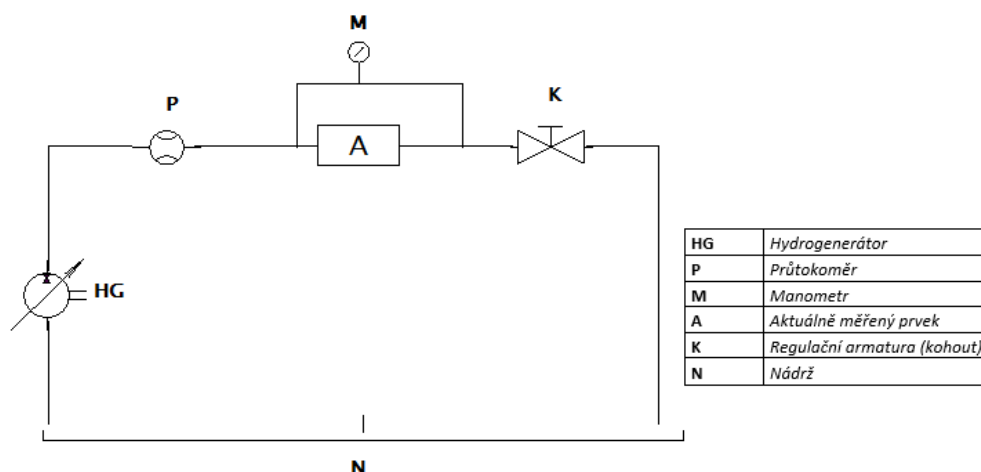
| Prvek | Typ | Vnější průměr (D) | Vnitřní průměr (d) |
|-----------|-------|--------------------|----------------------------------|
| | | [mm] | [mm] |
| Koleno | 90° | 20 | 14,4 |
| Koleno | 90° | 25 | 18 |
| Koleno | 90° | 32 | 23,2 |
| Prvek | Typ | Vnitřní průměr (d) | Vnitřní průměr (d ₁) |
| | | [mm] | [mm] |
| Zúžení | 25-20 | 18 | 14,4 |
| Zúžení | 32-25 | 23,2 | 18 |
| Rozšíření | 20-25 | 14,4 | 18 |
| Rozšíření | 25-32 | 18 | 23,2 |

Tabulka 3-1 Přehled měřených prvků

Tlakové difference jsem měřil pomocí obrácené U-trubice, avšak pro malý diferenční rozsah byly použity ve větší míře manometry. Měření ztrát na redukcích probíhalo v obou směrech jak pro typ zúžení tak i rozšíření.




V obvodu je zařazen hydrogenerátor nastavený na výkon 385W za ním se nachází indukční průtokoměr a přes různé varianty kolen a redukcí vedeme kapalinu (vodu) k měřenému prvku. Před a za měřeným prvkem jsou umístěná odběrná místa ve vzdálenostech podle níže uvedené normy. Za měřeným prvkem je regulační armatura v podobě kohoutu a kapalina je následně svedena hadicí do nádrže.

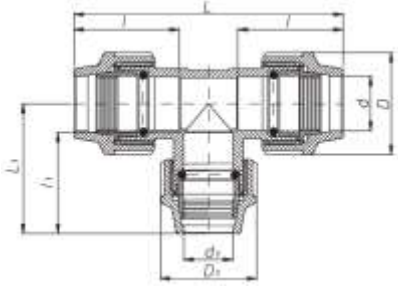
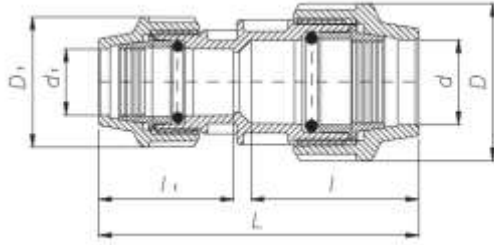
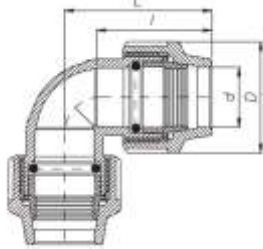
Schéma obvodu



Obrázek 3.2 Schéma měřicího obvodu

Popis prvků obvodu

| | |
|---|---|
| <p>Nádrž Objem: 80dm³ Výrobce: Valter Špalek</p> | |
| <p>Hydrogenerátor Výrobce: WILO Typ: TOP-S30/10 Výkon 390, 385, 335W</p> |  <p><i>Obrázek 3.3 Hydrogenerátor [17]</i></p> |
| <p>Indukční průtokoměr Typ: FN 2014.1 Výrobce: ELIS PLZEŇ a.s. Přesnost měření: ±0,2 % (10 až 100 % Q_{max}) Rozsah: DN6-DN1200</p> |  <p><i>Obrázek 3.4 Indukční průtokoměr [17]</i></p> |
| <p>Kulový kohout – uzavírací prvek Typ SVEK032XXX, SVEK025XXX Velikost DN32, DN25 Vnitřní průměr 18mm, 23,2 mm</p> | |
| <p>Manometr Typ BHV 5355 Výrobce BHV senzory s.r.o. Rozsah 0 – 20kPa Přesnost 0,5% Měřený tlak: 0-20kPa, 0-200kPa</p> |  <p><i>Obrázek 3.5 Manometr (diferenční) [17]</i></p> |

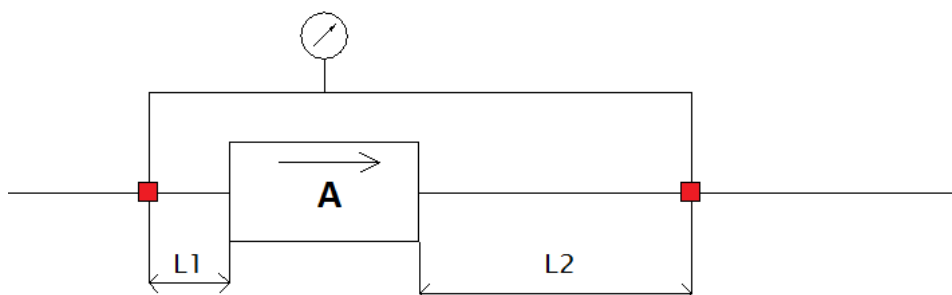
| | |
|---|--|
| <p>Potrubí (2typy) Typ STRO20P16X Vnější průměr: 20 mm Vnitřní průměr: 14,4 mm Výrobce WAVIN Ekoplastik, s.r.o.</p> <p>Potrubí Typ STRO25P16X Vnější průměr: 25 mm Vnitřní průměr: 18 mm Výrobce WAVIN Ekoplastik, s.r.o.</p> | |
| <p>T-kusy $d \times d_1 \times d$(mm): 25x25x25 L(mm): 160 $d \times d_1 \times d$(mm): 20x20x20 L(mm): 141 Výrobce: Unidelta</p> |  <p>Obrázek 3.6 Prvek: T-kus</p> |
| <p>U-trubice Školní výroba</p> | |
| <p>Měřené prvky</p> | |
| <p>Redukce (oboustranně) Výrobce: UNIDELTA 1.typ COD.1002 $d \times d_1$(mm): 25x20 L(mm): 128 2.typ COD.1002 $d \times d_1$(mm): 32x25 L(mm): 143</p> |  <p>Obrázek 3.7 Prvek: Rozšíření</p> |
| <p>Kolena 90° Typ: COD. 1006 d(mm): 20, 25, 32 L(mm): 63, 79, 88 Výrobce: Unidelta</p> |  <p>Obrázek 3.8 Prvek: Koleno</p> |

3.3 Postup měření

1. Montáž příslušného prvku do obvodu.
2. Montáž odpovídajícího měřidla tlakové difference (podle maximálního rozsahu- U-trubice nebo manometru).
3. Spuštění čerpadla kontrola těsnosti spojů.
4. Odvzdušnění celého obvodu (vzduch v potrubí by nám zkresloval měření).
5. Odečítání hodnoty průtoku na indukčním průtokoměru, odečítání hodnoty tlakové difference na manometru nebo měření výšky hladin v U-trubici pro následné určení rozdílu těchto výšek.
6. Uzavíráním regulační armatury snižujeme průtok.
7. Opakujeme bod č.:5
8. Tento postup opakujeme až do uzavření regulační armatury (10-15krát).
9. Montáž dalšího prvku, opakujeme postup bod č.: 2-8

Odběrná místa

Obrázek 3.9 popisuje volenou vzdálenost pro realizaci odběrných míst. Je stanovena normou. Tato vzdálenost se určuje podle vnitřního průměru prvku a je přesně popsána v obrázku. Správné zvolení odběrného místa pro měření statického tlaku je důležité z hlediska zkreslení měření. Při zvolení malých vzdáleností je měření zkresleno vířením naopak při velkých vzdálenostech měření ovlivňují třecí ztráty.



$$L1 > 2D \text{ a } L2 > 10D$$

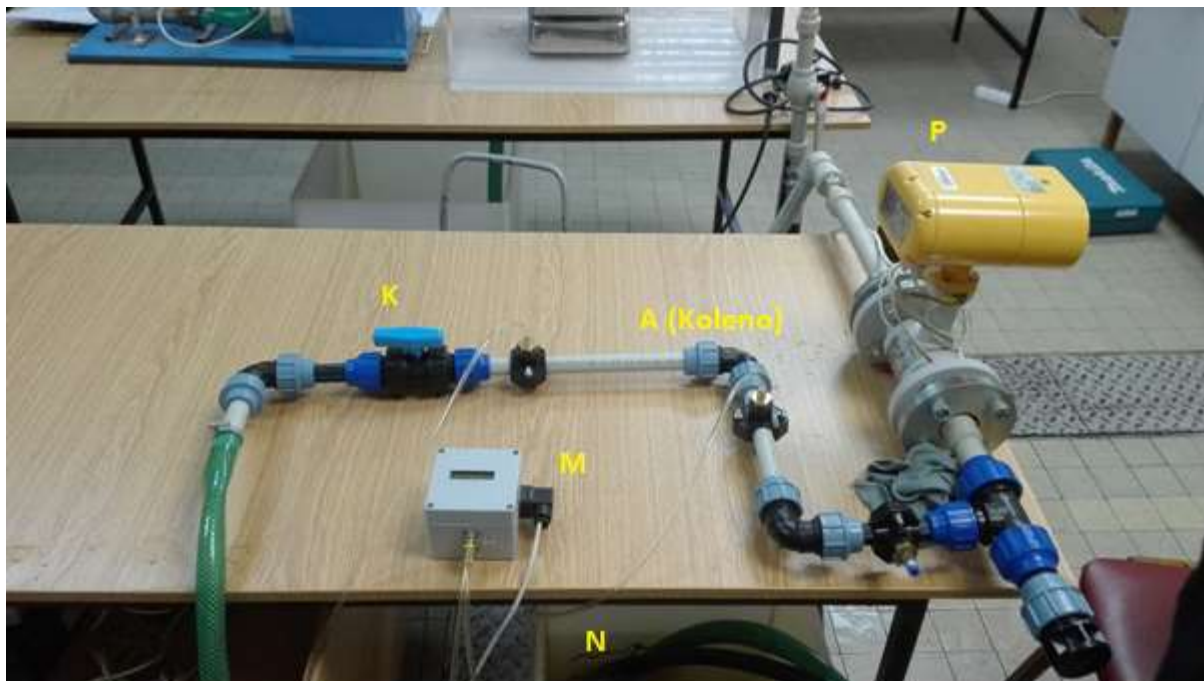
Kde: D...vnitřní průměr prvku

červeně jsou zvýrazněna odběrná místa

A... měřený prvek

Obrázek 3.9 Realizace odběrných míst

3.4 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení - kolena



Obrázek 3.10 Realizace měření prvku: koleno

Měřenými prvky byly kolena (90°). Měření bylo prováděno pro každý prvek samostatně. Pro určení součinitele místní ztráty kolena byl měřen průtok (Q_v) na indukčním průtokoměru a rozdíl výšek hladin na U-trubici před a za měřeným prvkem (Δh) pokud nebyla tlaková ztráta naměřena přímo na měřicím přístroji. Měřicí přístroj byl použit pro malý rozsah U-trubice. Při měření ztrát na kolenech byly zanedbány ztráty způsobené třením v částech potrubí do odběrných míst.

Příklad výpočtu pro koleno s vnitřním průměrem: 14,4mm (dosazení do vzorců)

Výpočet provedeme podle postupu uvedeného v kapitole 1.5

| Měření | Měřené veličiny | | Počítané veličiny | | | | |
|-----------|-----------------------|--------------|---------------------|---------------------|-------------|--------------|---------------|
| | Q_v | Δp_m | Q_v | Q_v^2 | v | Re | ζ_l |
| | [m ³ /hod] | [Pa] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m/s] | [1] | [1] |
| 1 | 2,84 | 21700 | 0,000789 | 8,07 | 4,84 | 69753 | 1,8496 |
| 2 | 2,63 | 19800 | 0,000731 | 6,92 | 4,49 | 64595 | 1,9680 |
| 3 | 2,47 | 18400 | 0,000686 | 6,10 | 4,21 | 60666 | 2,0734 |
| 4 | 2,35 | 16600 | 0,000653 | 5,52 | 4,01 | 57718 | 2,0665 |
| 5 | 2,20 | 14200 | 0,000611 | 4,84 | 3,75 | 54034 | 2,0170 |
| 6 | 2,06 | 12400 | 0,000572 | 4,24 | 3,51 | 50596 | 2,0089 |
| 7 | 1,80 | 9500 | 0,000500 | 3,24 | 3,07 | 44210 | 2,0158 |
| 8 | 1,52 | 7200 | 0,000422 | 2,31 | 2,59 | 37333 | 2,1424 |
| 9 | 1,24 | 4700 | 0,000344 | 1,54 | 2,11 | 30456 | 2,1015 |
| 10 | 0,85 | 2100 | 0,000236 | 0,72 | 1,45 | 20877 | 1,9982 |
| 11 | 0,43 | 600 | 0,000119 | 0,18 | 0,73 | 10561 | 2,2309 |
| 12 | 0,17 | 100 | 0,000046 | 0,03 | 0,28 | 4102 | 2,4651 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabulka 3-2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno s vnitřním průměrem 14,4 mm

Bylo použito naměřených dat z Tabulka 3-2 (data zvýrazněna červeně). Naměřené a vypočtené hodnoty pro další průměry kolen jsou tabelovány v příloze.

Výpočet rychlosti proudění z rovnice 1-27:

$$v = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot \frac{2,84}{3600}}{\pi \cdot 0,0144^2} = 4,84 \text{ ms}^{-1}$$

Určení typu proudění dle Reynoldsova čísla z rovnice 1-28:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{4,84 \cdot 0,0144}{\nu} = 69753$$

kde $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (pro teplotu 20°C)

Určení tlakové ztráty (pro prvek měřený U-trubicí):

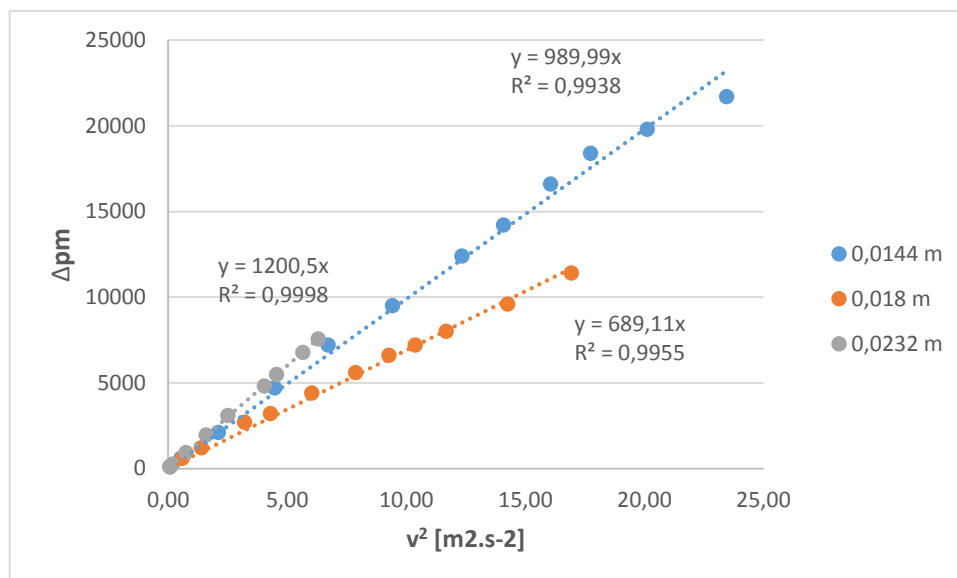
$$\Delta p_m = 21700 \text{ Pa}$$

Na tomto prvku byla tlaková ztráta určena pomocí diferenčního manometru.

Určení součinitele místní ztráty z rovnice 1-30:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p_m}{\rho \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 21700}{1000 \cdot 4,84^2} = 1,85$$

Postup výpočtu obecně



Obrázek 3.11 Závislost $\Delta p_m - v^2$

Pro výpočet ztrátového součinitele použijeme koeficient z lineární regresní funkce (Obrázek 3.11).

Rovnice regresní funkce

$$y = K \cdot x \quad 3-1$$

Vzorec pro výpočet místní ztráty

$$\Delta p_m = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad 3-2$$

Koeficient K vyjádříme

$$K = \frac{\zeta \cdot \rho}{2} \quad 3-3$$

V dalším kroku dosadíme

$$\Delta p_m = K \cdot v^2 \quad 3-4$$

Obecné odvození ztrátového součinitele při znalosti koeficientu K regresní funkce (z grafu Obrázek 3.11).

$$\zeta_M = \frac{2 \cdot K}{\rho}$$

Vypočtené hodnoty obecného ztrátového součinitele jsou uvedeny v Tabulka 3-3.

Hodnoty ztrátového součinitele

| | | | |
|--------------|--------|-------|--------|
| Světlost [m] | 0,0144 | 0,018 | 0,0232 |
| ζ_M | 1,98 | 1,38 | 2,40 |

Tabulka 3-3

Vyhodnocení měření

Tabulka 1 – Porovnání součinitelů místního odporu ξ u kolen různých konstrukcí

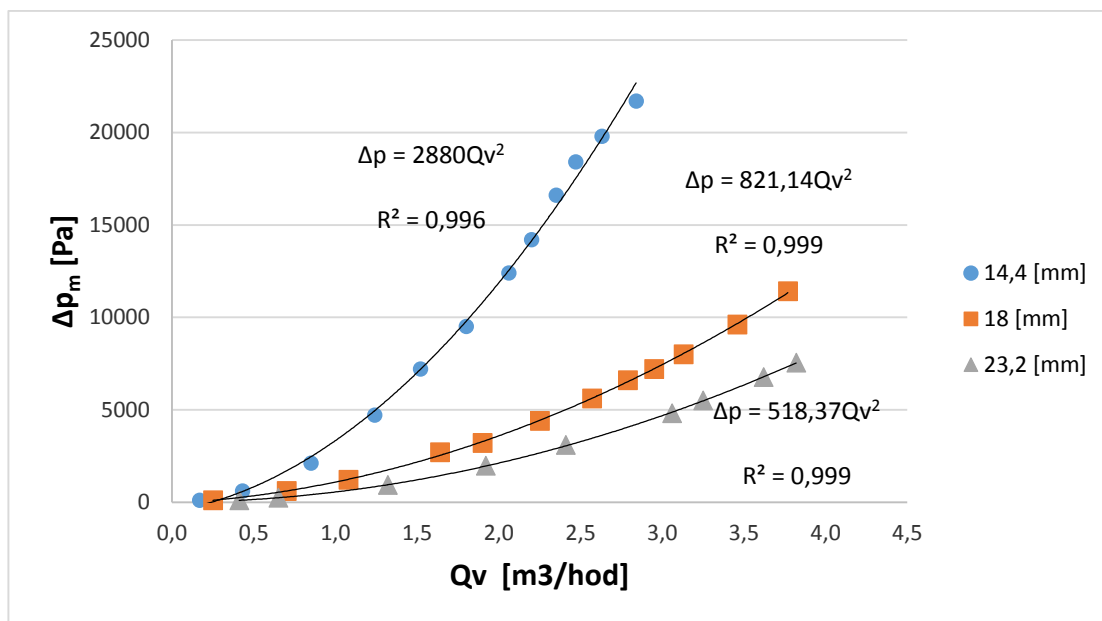
| Jmenovitá světlost potrubí DN | Hodnoty součinitele místního odporu ξ pro kolena s úhlem 90°, jejichž vnitřní průměr je větší nebo stejný jako trubka (podle ČSN 75 5455) | Hodnoty součinitele místního odporu ξ pro kolena s úhlem 90°, jejichž vnitřní průměr je menší než trubka (ukázka hodnot uvedených jedním z výrobců) |
|-------------------------------|---|---|
| 10 | 2,0 | 15,9 |
| 15 | 2,0 | 9,9 |
| 20 | 1,5 | 7,1 |
| 25 | 1,5 | 4,7 |
| 32 | 1,0 | 4,3 |
| 40 | 1,0 | 4,0 |
| 50 | 1,0 | 4,7 |

Tabulka 3-4 Katalogové hodnoty součinitele místní ztráty [12]

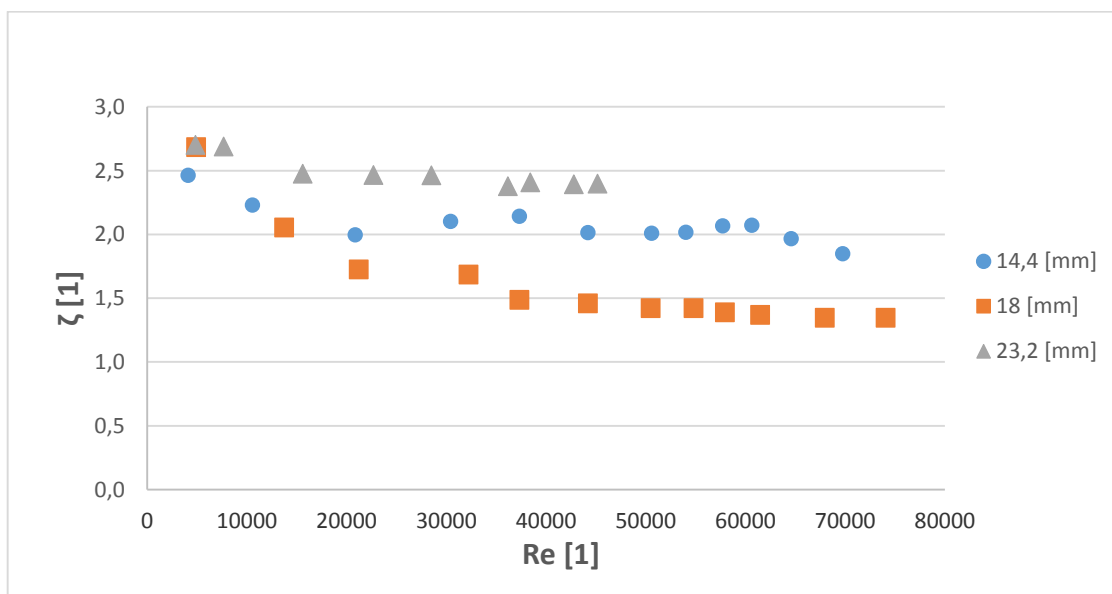
Porovnání tabulek

Hodnoty ztrátového součinitele pro porovnání s hodnotami katalogovými viz Tabulka 3-4 jsem uvažoval po jejich ustálení tzn. od hodnot $Re > 30000$. Po srovnání katalogové tabulky a mnou naměřených hodnot můžu říci, že hodnoty ztrátového součinitele nabývají přibližně stejných hodnot až na prvek: koleno (vnitřní průměr: 0,0232 mm). Tento prvek dosahuje při mém měření podstatně vyšší hodnoty ztrátového součinitele.

Grafické vyhodnocení



Obrázek 3.12 Závislost tlakové ztráty na průtoku pro jednotlivá kolena



Obrázek 3.13 Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle u jednotlivých kol

V grafech Obrázek 3.12 Závislost tlakové ztráty na průtoku pro jednotlivá kolena Obrázek 3.13 jsou vyobrazeny závislosti tlakové ztráty Δp_m na průtoku Q_v respektive ztrátového součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle Re .

Z grafu (Obrázek 3.12) je zřejmé že, při porovnání různých průměrů potrubí vykazuje nejmenší ztrátu v celém průběhu potrubí s největším vnitřním průměrem 0,0232 mm. V grafu (Obrázek 3.13) sledujeme ustálenou hodnotu místní ztráty ξ při hodnotách $Re > 30000$, proto při návrhu a výpočtu potrubí uvažujeme tyto hodnoty.

3.5 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení- zúžení

| Naměřené hodnoty | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Měření | h_1 | h_2 | p_1 | p_2 | Δp_{stat} | Q_v | Q_v |
| | [mm] | [mm] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [m ³ hod ⁻¹] | [m ³ s ⁻¹] |
| 1 | 1010 | 170 | 9908 | 1668 | 8240 | 3,3 | 0,00092 |
| 2 | 1005 | 220 | 9859 | 2158 | 7701 | 3,1 | 0,00086 |
| 3 | 985 | 260 | 9663 | 2551 | 7112 | 3,0 | 0,00083 |
| 4 | 970 | 275 | 9516 | 2698 | 6818 | 2,9 | 0,00081 |
| 5 | 955 | 320 | 9369 | 3139 | 6229 | 2,7 | 0,00075 |
| 6 | 935 | 360 | 9172 | 3532 | 5641 | 2,6 | 0,00072 |
| 7 | 890 | 450 | 8731 | 4415 | 4316 | 2,2 | 0,00061 |
| 8 | 870 | 480 | 8535 | 4709 | 3826 | 2,1 | 0,00058 |
| 9 | 845 | 530 | 8289 | 5199 | 3090 | 1,9 | 0,00053 |
| 10 | 785 | 610 | 7701 | 5984 | 1717 | 1,5 | 0,00042 |
| 11 | 760 | 655 | 7456 | 6426 | 1030 | 1,0 | 0,00028 |
| 12 | 745 | 685 | 7308 | 6720 | 589 | 0,7 | 0,00019 |
| 13 | 730 | 700 | 7161 | 6867 | 294 | 0,3 | 8,3E-05 |
| 14 | 725 | 710 | 7112 | 6965 | 147 | 0,1 | 2,8E-05 |
| 15 | 720 | 720 | 7063 | 7063 | 0 | 0 | 0 |

Tabulka 3-5 Naměřené hodnoty pro zúžení 32-25

| Měření | Q_v^2 | v_2 | v_1 | p_{DYN} | Re_2 | Re_1 | λ_2 | λ_1 | $p_{\text{tr}2}$ | $p_{\text{tr}1}$ | p_{tr} | Δp_m | ζ_1 | ζ_2 |
|--------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------|--------|-------------|-------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|-----------|-----------|
| | [m ³ hod ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [Pa] | [1] | [1] | [1] | [1] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [1] | [1] |
| 1 | 10,89 | 2,17 | 3,60 | -4137 | 50308 | 64841 | 0,02113 | 0,01983 | 99 | 1286 | 1386 | 2717 | 1,16 | 0,42 |
| 2 | 9,61 | 2,04 | 3,38 | -3651 | 47259 | 60911 | 0,02146 | 0,02014 | 89 | 1153 | 1242 | 2808 | 1,35 | 0,49 |
| 3 | 9,00 | 1,97 | 3,27 | -3419 | 45734 | 58946 | 0,02164 | 0,02031 | 84 | 1089 | 1173 | 2520 | 1,30 | 0,47 |
| 4 | 8,41 | 1,91 | 3,17 | -3195 | 44210 | 56981 | 0,02182 | 0,02048 | 79 | 1026 | 1105 | 2518 | 1,39 | 0,50 |
| 5 | 7,29 | 1,77 | 2,95 | -2769 | 41161 | 53052 | 0,02221 | 0,02085 | 70 | 905 | 975 | 2484 | 1,58 | 0,57 |
| 6 | 6,76 | 1,71 | 2,84 | -2568 | 39636 | 51087 | 0,02242 | 0,02105 | 65 | 848 | 913 | 2160 | 1,48 | 0,54 |
| 7 | 4,84 | 1,45 | 2,40 | -1839 | 33538 | 43227 | 0,02338 | 0,02194 | 49 | 633 | 682 | 1796 | 1,72 | 0,62 |
| 8 | 4,41 | 1,38 | 2,29 | -1675 | 32014 | 41262 | 0,02365 | 0,02220 | 45 | 583 | 628 | 1522 | 1,60 | 0,58 |
| 9 | 3,61 | 1,25 | 2,07 | -1371 | 28965 | 37333 | 0,02425 | 0,02276 | 38 | 490 | 527 | 1191 | 1,53 | 0,55 |
| 10 | 2,25 | 0,99 | 1,64 | -855 | 22867 | 29473 | 0,02573 | 0,02415 | 25 | 324 | 349 | 513 | 1,06 | 0,38 |
| 11 | 1,00 | 0,66 | 1,09 | -380 | 15245 | 19649 | 0,02847 | 0,02672 | 12 | 159 | 172 | 479 | 2,22 | 0,80 |
| 12 | 0,49 | 0,46 | 0,76 | -186 | 10671 | 13754 | 0,03113 | 0,02922 | 7 | 85 | 92 | 311 | 2,94 | 1,06 |
| 13 | 0,09 | 0,20 | 0,33 | -34 | 4573 | 5895 | 0,03847 | 0,03611 | 1 | 19 | 21 | 239 | 12,31 | 4,46 |
| 14 | 0,01 | 0,07 | 0,11 | -4 | 1524 | 1965 | 0,05064 | 0,04752 | 0 | 3 | 3 | 140 | 64,99 | 23,55 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabulka 3-6 Vypočtené hodnoty pro zúžení 32-25

Měřenými prvky byly prvky redukce měřené v obou směrech. Pracovní název redukcí je pojmenován podle vnějších průměrů prvků např.: zúžení 32-25.

Příklad výpočtu pro zúžení

Bylo použito naměřených dat z Tabulka 3-5 (data zvýrazněna červeně). Naměřené a vypočtené hodnoty pro další typy redukci jsou tabelovány v příloze.

Výpočet provedeme podle kapitoly 1.4

Výpočet tlakové ztráty statické místní

$$\Delta p_{stat} = \Delta h \cdot \rho \cdot g = 0,175 \cdot \rho \cdot g = 1716,75 \text{ Pa}$$

$$\text{Kde: } g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, \rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Δh je rozdíl výšek před a za prvkem měřený U-trubicí

Výpočet tlakových ztrát dynamických místních pro rychlosti v_1 a v_2 :

$$p_{DYN1} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 1,64^2 = 1344 \text{ Pa}$$

$$p_{DYN2} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 = 490 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{DYN} = p_{DYN2} - p_{DYN1} = 490 - 1344 = -854 \text{ Pa}$$

Kde:

v_1 je rychlost v potrubí o světlosti d_1 (18 mm)

$$v_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{\frac{1,5}{3600}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}} = 1,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

v_2 je rychlost v potrubí o světlosti d_2 (23,2 mm)

$$v_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{\frac{1,5}{3600}}{\frac{\pi \cdot 0,0232^2}{4}} = 0,99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet tlakové ztráty třecí:

$$\Delta p_{tř} = \Delta p_{tř1} + \Delta p_{tř2} = 324 + 25 = 349 \text{ Pa}$$

Výpočet třecí ztráty pro rychlost v_1

$$\Delta p_{tř1} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2} \rho = 0,0241 \cdot \frac{0,18}{0,018} \cdot \frac{1,64^2}{2} \cdot \rho = 324 \text{ Pa}$$

Kde:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,64 \cdot 0,018}{0,000001} = 29520$$

kde $\nu = 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{29520}} = 0,0241$$

Výpočet třecí ztráty pro rychlost v_2 (analogicky jako pro rychlost v_1)

$$\Delta p_{tř2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2} \rho = 25 \text{ Pa}$$

Výpočet místní ztráty

$$\Delta p_m = \Delta p_{stat} + (p_{DYN2} - p_{DYN1}) - \Delta p_{tř} = 513,3$$

Výpočet součinitele místní ztráty pro rychlost v_2 (vstupní)

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p_m}{\rho \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 513,3}{1000 \cdot 0,99^2} = 1,06$$

Součinitel místní ztráty se pro redukce určuje pro rychlosti jak vstupní tak výstupní.

3.6 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení- rozšíření

| Měření | h_1 | h_2 | p_1 | p_2 | Δp_{stat} | Q_v | Q_v |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | [mm] | [mm] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [m ³ hod ⁻¹] | [m ³ s ⁻¹] |
| 1 | 125 | 350 | 1226 | 3434 | 2207 | 3,8 | 0,00104 |
| 2 | 175 | 370 | 1717 | 3630 | 1913 | 3,5 | 0,00098 |
| 3 | 210 | 400 | 2060 | 3924 | 1864 | 3,5 | 0,00096 |
| 4 | 250 | 420 | 2453 | 4120 | 1668 | 3,3 | 0,00093 |
| 5 | 305 | 450 | 2992 | 4415 | 1422 | 3,1 | 0,00086 |
| 6 | 355 | 470 | 3483 | 4611 | 1128 | 2,8 | 0,00079 |
| 7 | 385 | 480 | 3777 | 4709 | 932 | 2,6 | 0,00072 |
| 8 | 445 | 505 | 4365 | 4954 | 589 | 2,1 | 0,00059 |
| 9 | 500 | 525 | 4905 | 5150 | 245 | 1,6 | 0,00044 |
| 10 | 535 | 540 | 5248 | 5297 | 49 | 1,0 | 0,00026 |
| 11 | 555 | 555 | 5445 | 5445 | 0 | 0 | 0 |

Tabulka 3-7 Naměřené hodnoty pro rozšíření 25-32

| Vypočtené hodnoty | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------|-------|-------|-------------|-------------|------|------|------|--------------|-----------|-----------|
| Měření | Qv2 | v1 | v2 | pDYN | Re1 | Re2 | λ 1 | λ 2 | ptř1 | ptř2 | ptř | Δp_m | ζ_1 | ζ_2 |
| | [m ³ hod ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [Pa] | [1] | [1] | [1] | [1] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [1] | [1] |
| 1 | 14,06 | 4,09 | 2,46 | 5342 | 73683 | 44354 | 0,01920 | 0,02180 | 322 | 662 | 984 | 6566 | 0,78 | 2,16 |
| 2 | 12,32 | 3,83 | 2,31 | 4680 | 68967 | 41516 | 0,01952 | 0,02217 | 287 | 590 | 876 | 5717 | 0,78 | 2,15 |
| 3 | 12,04 | 3,79 | 2,28 | 4574 | 68181 | 41042 | 0,01958 | 0,02223 | 281 | 578 | 859 | 5579 | 0,78 | 2,15 |
| 4 | 11,16 | 3,65 | 2,19 | 4238 | 65627 | 39505 | 0,01977 | 0,02244 | 263 | 541 | 803 | 5102 | 0,77 | 2,12 |
| 5 | 9,49 | 3,36 | 2,02 | 3604 | 60518 | 36430 | 0,02017 | 0,02290 | 228 | 469 | 697 | 4329 | 0,77 | 2,11 |
| 6 | 8,07 | 3,10 | 1,87 | 3064 | 55802 | 33591 | 0,02059 | 0,02337 | 198 | 407 | 605 | 3587 | 0,75 | 2,06 |
| 7 | 6,71 | 2,83 | 1,70 | 2548 | 50890 | 30634 | 0,02107 | 0,02392 | 168 | 346 | 515 | 2966 | 0,74 | 2,05 |
| 8 | 4,49 | 2,31 | 1,39 | 1707 | 41655 | 25075 | 0,02215 | 0,02514 | 119 | 244 | 363 | 1933 | 0,72 | 1,99 |
| 9 | 2,50 | 1,72 | 1,04 | 948 | 31045 | 18688 | 0,02384 | 0,02706 | 71 | 146 | 217 | 977 | 0,66 | 1,81 |
| 10 | 0,90 | 1,04 | 0,62 | 343 | 18666 | 11236 | 0,02707 | 0,03073 | 29 | 60 | 89 | 303 | 0,56 | 1,55 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

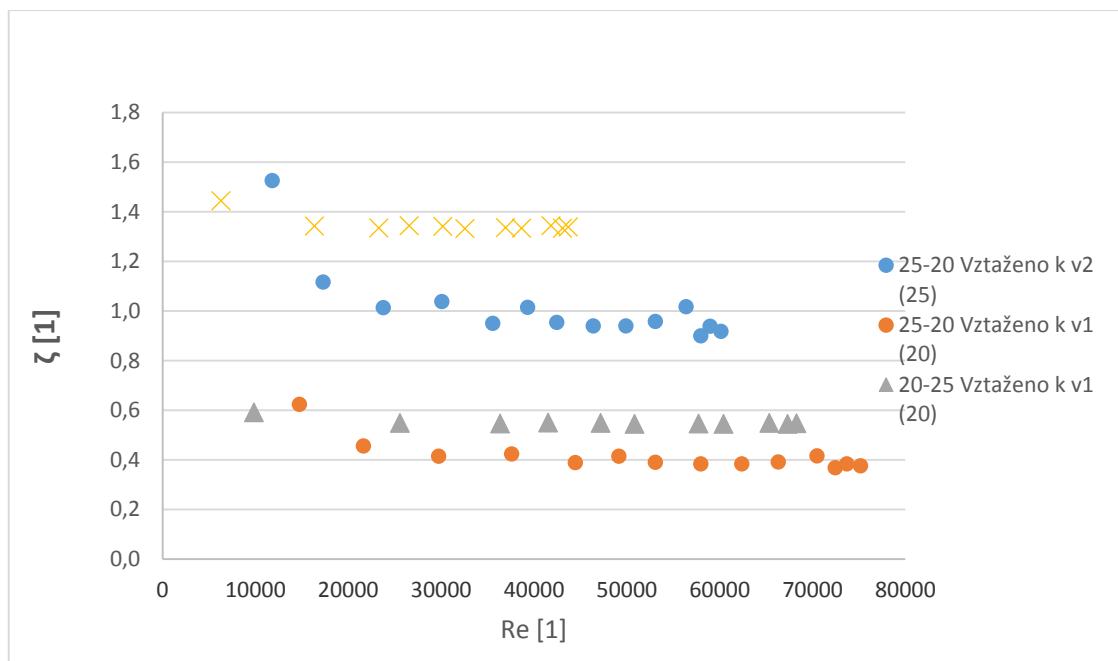
Tabulka 3-8 Vypočtené hodnoty pro rozšíření 25-32

Příklad výpočtu pro rozšíření

Výpočet je obdobný jako v kapitole 3.4, změna je pouze ve výpočtu tlakové ztráty dynamické viz kapitola 1.4. Hodnoty vypočtených ztrátových součinitelů jsou tabelovány.

Rozbor naměřených hodnot

Graf (Obrázek 3.14) popisuje závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle. Přesně je zde tato závislost určena pro prvek redukce se světlostmi 0,0144 m a 0,018 mm, který byl měřený oboustranně, tedy jako zúžení i rozšíření. Ztrátový součinitel se u redukcí vztahuje k oběma rychlostem (vstupní i výstupní) jednotlivé závislosti proto určuje legenda. Vidíme, že v obou případech ztrátový součinitel vztažený k vstupní rychlosti dosahuje vyšších hodnot, než součinitel vztažený k rychlosti výstupní.



Obrázek 3.14 Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

Porovnání výsledků

Naměřené výsledky součinitelů místní ztráty jsou porovnávány s literaturou:

- Mechanika tekutin [4]
- Internal flow system [6]

Porovnáním naměřených hodnot s literaturou u prvku: Rozšíření viz (Tabulka 3-9 Rozšíření 20-25, Tabulka 3-10 Rozšíření 25-32), je nutno usoudit fakt, že naměřené hodnoty dosahují podstatně vyšších čísel.

| Rozšíření 20-25 | | | |
|-----------------------|---------------|-------------------|--------------------|
| | d[mm] | d[m] | S[m ³] |
| Přítok (ζ_1) | 14,4 | 0,0144 | 0,000163 |
| Odtok (ζ_2) | 18 | 0,018 | 0,000254 |
| | | | |
| | ζ_1 | ζ_2 | |
| Mechanika tekutin | 0,1296 | 0,31640625 | |
| Internal flow systems | 0,18 | | |
| Naměřeno | 0,55 | 1,34 | |

Tabulka 3-9 Rozšíření 20-25

| Rozšíření 25-32 | | | |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | d[mm] | d[m] | S[m ³] |
| Přítok (ζ_1) | 18 | 0,018 | 0,000254 |
| Odtok (ζ_2) | 23,2 | 0,0232 | 0,000423 |
| | | | |
| | ζ_1 | ζ_2 | |
| Mechanika tekutin | 0,158434289 | 0,437231154 | |
| Internal flow systems | 0,09 | | |
| Naměřeno | 0,78 | 2,16 | |

Tabulka 3-10 Rozšíření 25-32

Při porovnání tabelovaných hodnot pro prvek: Zúžení viz.(Tabulka 3-11 Zúžení 25-20, Tabulka 3-12 Zúžení 32-25) dosahují hodnoty ztrátového součinitele velice podobných hodnot. Při pohledu na graf (Obrázek 3.15 Porovnání hodnot ztrátového součinitele) je zřejmé, že se hodnoty naměřené a určené literaturou Mechanika tekutin téměř rovnají. V tomto případě tedy prvek vykazuje shodnou ztrátu.

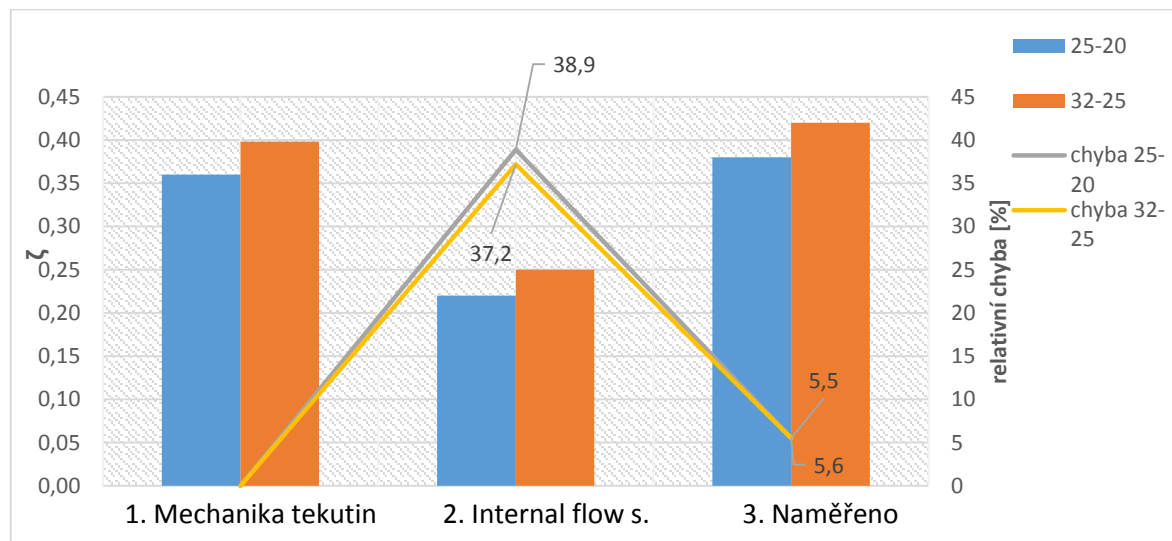
| Zúžení 25-20 | | | |
|-----------------------|-------------------|-------------|--------------------|
| | d[mm] | d[m] | S[m ³] |
| Přítok (ζ_1) | 18 | 0,018 | 0,000254 |
| Odtok (ζ_2) | 14,4 | 0,0144 | 0,000163 |
| | | | |
| | ζ_1 | ζ_2 | |
| Mechanika tekutin | 0,87890625 | 0,36 | |
| Internal flow systems | | 0,22 | |
| Naměřeno | 0,92 | 0,38 | |

Tabulka 3-11 Zúžení 25-20

| Zúžení 32-25 | | | |
|-----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | d[mm] | d[m] | S[m ³] |
| Přítok (ζ_1) | 23,2 | 0,0232 | 0,000423 |
| Odtok (ζ_2) | 18 | 0,018 | 0,000254 |
| | | | |
| | ζ_1 | ζ_2 | |
| Mechanika tekutin | 1,098465722 | 0,39803805 | |
| Internal flow systems | | 0,25 | |
| Naměřeno | 1,16 | 0,42 | |

Tabulka 3-12 Zúžení 32-25

V grafu (Obrázek 3.15) jsou sloupcově porovnány ztrátové součinitele. Kombinovaně je zde vyobrazena relativní chyba s porovnávaným etalonem (mechanika tekutin. V tomto případě se značně etalonu liší ztrátový součinitel uvedený v literatuře Internal flow system. Naopak měřený součinitel vykazuje malou chybu (5,6%).



Obrázek 3.15 Porovnání hodnot ztrátového součinitele

Výpočet ztrátových součinitelů podle Mechaniky tekutin [4]:

Rozšíření

| Výpočet (pro přítokovou rychlost) | Výpočet ξ_2 (pro odtokovou rychlost) |
|--|--|
| $\zeta_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$ | $\zeta_2 = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2$ |

Zúžení

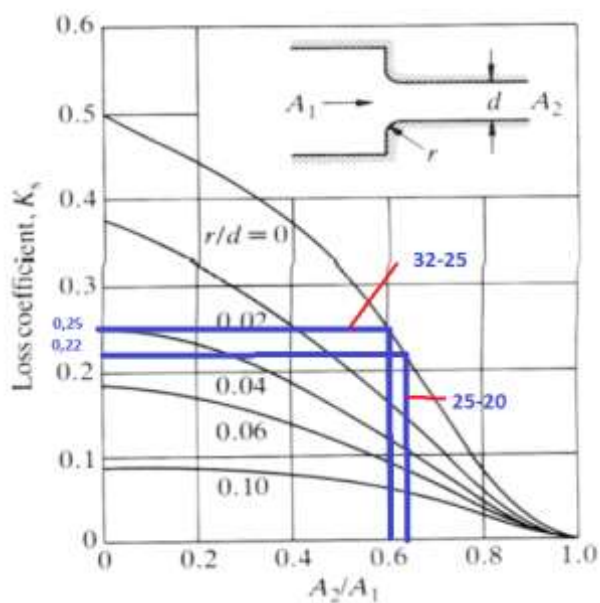
| Výpočet ξ_1 (pro přítokovou rychlost) | Výpočet ξ_2 (pro odtokovou rychlost) |
|--|--|
| $\zeta_1 = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \cdot \frac{S_1}{S_2}$ | $\zeta_2 = 1 - \frac{S_2}{S_1}$ |

Určení ztrátových součinitelů podle Internal flow system [6]:

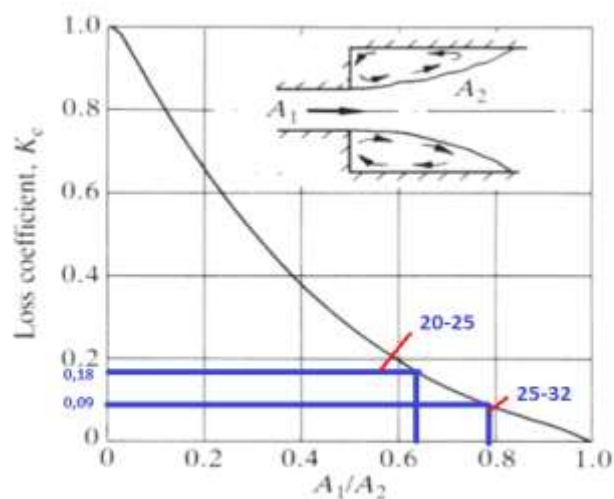
Pro určení ztrátových součinitelů podle této literatury je třeba vypočítat definovaný poměr světlostí. A to konkrétně poměr světlosti vstupní k poměru světlosti výstupní. Tato literatura nám proto uvádí jen ztrátový součinitel vztažený pouze k jedné z rychlostí v určité části redukce. U rozšíření to je ztrátový součinitel ξ_1 (pro vstupní rychlost) a u zúžení ξ_2 (pro výstupní rychlost). Proto můžeme s porovnávat s ostatní literaturou a s naměřenými hodnotami jen tyto konkrétní hodnoty.

Poměr světlostí

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,0232^2}{4}} = 0,78$$



Obrázek 3.16 Odečtení hodnot (Zúžení) [6]



Obrázek 3.17 Odečtení hodnot (Rozšíření) [6]

Určení ztrátových součinitelů z naměřených hodnot:

Z hodnot naměřených v laboratoři byly vybrány velikosti ztrátových součinitelů, které byly dosaženy po ustálení v závislosti na Re . Velikost $Re > 40000$.

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce je realizace měření, výpočet ztrátových součinitelů kolen a redukcí a jejich porovnání s obecnými vzory.

Z porovnání naměřených hodnot s literaturou a katalogy vyplývá to, že pro většinu mnohou měřených prvků nelze použít pro návrh obvodu ztrátový součinitel teoretický. Je určen pro ideální tvary prvků, kterých nízkonákladovou výrobou nelze dosáhnout. Vypočtený ztrátový součinitel u všech typů prvků dosahoval vyšších hodnot než u součinitelů teoretických.

Měřené prvky byly vybrány z důvodu jejich využití v běžné praxi. Určení ztrátového součinitele probíhalo podle obecných návodů a norem. Zkreslení hodnot případným zavířením v odběrných místech tlaku můžu vyloučit z důvodu volby normovaných odběrných míst. Některé prvky např. koleno o světlosti 0,0232 m vykazovalo velmi vysokou ztrátu, ale i po důkladném prozkoumání měření a výpočtů tohoto prvku nebyla nalezena chyba. Ostatní prvky vykazovaly ztrátu málo přesahující teoretickou. Usuzuji proto, že naměřený reálný součinitel je objektivní.

Měření je zpracováno dle postupu, jež je součástí této práce. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zde tabelovány pro porovnání s obecnými a interpretovány grafy pro přehlednost. Tabulek a grafů bylo použito hodně, proto jsou ve větší míře součástí příloh, které jsou umístěné za hlavní textovou částí.

5 Literatura

- [1] DRÁBKOVÁ, S. a kol. [i]Mechanika tekutin.[/i] [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257s. [cit. 2016-04-05]. ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [2] NOSKIEVIČ, J. [i]Mechanika tekutin.[/i] Praha: SNTL Praha, 1987. 354 s
- [3] Bojko, M., Kozubková, M., Rautová, J.: *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*, VŠB – TU Ostrava, 2007, 182 s., ISBN 80-86634-53-1
- [4] JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. ISBN 80-248-0038-1
- [5] JANALÍK, Jaroslav. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava, 1995. In: [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_tek_mech.pdf
- [6] MILLER, M., S. *Internal Flow System* ; BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5
- [7] INAMDAR, Shreeram. *Minor losses in pipes: Losses caused by fittings, bends, valves, etc.* In: [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://udel.edu/~inamdar/EGTE215/Minor_loss.pdf
- [8] BHV senzory s.r.o. *DIFERENČNÍ TLAKOVÉ SNÍMAČE BHV 5355*, Kněževes u Prahy, 2010. In: [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.bhvsenzory.cz/data/products/file/bhv_5355.pdf
- [9] Ing. Jakub Vrána, Ph.D. *Vliv místních odporů na tlakové ztráty v potrubí Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubu>* [online]. Brno, 2012[cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubu>
- [10] *Ústav počítačové a řídicí techniky* [online]. VŠCHT Praha, 2013 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/>
- [11] *Hydraulika* [online]. Praha 6: ČVUT v Praze, Fakulta stavební Katedra hydrauliky a hydrologie, 2016 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/>
- [12] <http://www.tzb-info.cz/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubu>
- [13] *Elis Plzeň: Výrobce průtokoměrů kapalin* [online]. Plzeň [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.elis.cz/>
- [14] *Wilo: CS* [online]. Čestlice [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.wilo.cz/>

- [15] *Wavin: Ekoplatik* [online]. Kostelec nad Labem, 2015 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://cz.wavin.com/web/wavin-czech.htm>
- [16] *UNIDELTA* [online]. Vestone, 2016 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.unidelta.com/en/index/1-0.html>
- [17] RAUTOVÁ, Jana. *Měření charakteristik paralelně a sériově řazených potrubí*, VŠB-TU Ostrava, 2010. In: [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_charakteristik.pdf

Seznam příloh

Přílohy jsou umístěny za textovou částí ve vazbě a v příloze na CD

Příloha A: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno (světlost 0,0144m)

Příloha B: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno (světlost 0,018m)

Příloha B: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno (světlost 0,0232m)

Příloha D: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro zúžení 25-20

Příloha E: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro rozšíření 20-25

CD příloha umístěna v zadním přidešti

Chtěl bych poděkovat Ing. Janě Jablonské, Ph.D. především za vedení při tvorbě této práce, cenné rady a připomínky.

Příloha A: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno (světlost 0,0144m)

| | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Koleno vnitřní průměr | d[mm] | d[m] | | | | | |
| | 14,4 | 0,0144 | | | | | |
| Měření | Měřené veličiny | | Počítané veličiny | | | | |
| | Q_v | Δp_m | Q_v | Q_v² | v | Re | ζ₁ |
| | [m³/hod] | [Pa] | [m³/s] | [m³/s] | [m/s] | [1] | [1] |
| 1 | 2,84 | 21700 | 0,000789 | 8,07 | 4,84 | 69753 | 1,8496 |
| 2 | 2,63 | 19800 | 0,000731 | 6,92 | 4,49 | 64595 | 1,9680 |
| 3 | 2,47 | 18400 | 0,000686 | 6,10 | 4,21 | 60666 | 2,0734 |
| 4 | 2,35 | 16600 | 0,000653 | 5,52 | 4,01 | 57718 | 2,0665 |
| 5 | 2,20 | 14200 | 0,000611 | 4,84 | 3,75 | 54034 | 2,0170 |
| 6 | 2,06 | 12400 | 0,000572 | 4,24 | 3,51 | 50596 | 2,0089 |
| 7 | 1,80 | 9500 | 0,000500 | 3,24 | 3,07 | 44210 | 2,0158 |
| 8 | 1,52 | 7200 | 0,000422 | 2,31 | 2,59 | 37333 | 2,1424 |
| 9 | 1,24 | 4700 | 0,000344 | 1,54 | 2,11 | 30456 | 2,1015 |
| 10 | 0,85 | 2100 | 0,000236 | 0,72 | 1,45 | 20877 | 1,9982 |
| 11 | 0,43 | 600 | 0,000119 | 0,18 | 0,73 | 10561 | 2,2309 |
| 12 | 0,17 | 100 | 0,000046 | 0,03 | 0,28 | 4102 | 2,4651 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Příloha B: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno (světlost 0,018m)

| | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Koleno vnitřní průměr | d[mm] | d[m] | | | | | |
| | 18 | 0,018 | | | | | |
| Měření | Měřené veličiny | | Počítané veličiny | | | | |
| | Q_v | Δp_m | Q_v | Q_v² | v | Re | ζ₁ |
| | [m³/hod] | [Pa] | [m³/s] | [m³/s] | [m/s] | [1] | [1] |
| 1 | 3,77 | 11400 | 0,00105 | 14,21 | 4,12 | 74076 | 1,3463 |
| 2 | 3,46 | 9600 | 0,00096 | 11,97 | 3,78 | 67985 | 1,3459 |
| 3 | 3,13 | 8000 | 0,00087 | 9,80 | 3,42 | 61501 | 1,3706 |
| 4 | 2,95 | 7200 | 0,00082 | 8,70 | 3,22 | 57964 | 1,3887 |
| 5 | 2,79 | 6600 | 0,00078 | 7,78 | 3,05 | 54820 | 1,4231 |
| 6 | 2,57 | 5600 | 0,00071 | 6,60 | 2,81 | 50497 | 1,4231 |
| 7 | 2,25 | 4400 | 0,00063 | 5,06 | 2,46 | 44210 | 1,4588 |
| 8 | 1,90 | 3200 | 0,00053 | 3,61 | 2,07 | 37333 | 1,4878 |
| 9 | 1,64 | 2700 | 0,00046 | 2,69 | 1,79 | 32224 | 1,6849 |
| 10 | 1,08 | 1200 | 0,00030 | 1,17 | 1,18 | 21221 | 1,7268 |
| 11 | 0,70 | 600 | 0,00019 | 0,49 | 0,76 | 13754 | 2,0552 |
| 12 | 0,25 | 100 | 0,00007 | 0,06 | 0,27 | 4912 | 2,6855 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Příloha C: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno (světlost 0,0232m)

| Koleno vnitřní průměr | d[mm] | d[m] | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------|--------|------------|--------------|---------------------|---------------------|-------|-------|-----------|
| | 23,2 | 0,0232 | | | | | | | | |
| Měření | Měřené veličiny | | | | | Počítané veličiny | | | | |
| | Q_v | h1(před) | h2(za) | Δh | Δp_m | Q_v | Q_v^2 | v | Re | ζ_1 |
| | [m ³ /hod] | [mm] | [mm] | [m] | [Pa] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m/s] | [1] | [1] |
| 1 | 3,82 | 880 | 110 | 0,77 | 7554 | 0,00106 | 14,59 | 2,51 | 45182 | 2,3977 |
| 2 | 3,62 | 870 | 180 | 0,69 | 6769 | 0,00101 | 13,10 | 2,38 | 42817 | 2,3926 |
| 3 | 3,25 | 850 | 290 | 0,56 | 5494 | 0,00090 | 10,56 | 2,14 | 38440 | 2,4091 |
| 4 | 3,06 | 835 | 345 | 0,49 | 4807 | 0,00085 | 9,36 | 2,01 | 36193 | 2,3779 |
| 5 | 2,41 | 795 | 480 | 0,32 | 3090 | 0,00067 | 5,81 | 1,58 | 28505 | 2,4644 |
| 6 | 1,92 | 760 | 560 | 0,20 | 1962 | 0,00053 | 3,69 | 1,26 | 22709 | 2,4653 |
| 7 | 1,32 | 725 | 630 | 0,10 | 932 | 0,00037 | 1,74 | 0,87 | 15613 | 2,4775 |
| 8 | 0,65 | 705 | 680 | 0,03 | 245 | 0,00018 | 0,42 | 0,43 | 7688 | 2,6887 |
| 9 | 0,41 | 700 | 690 | 0,01 | 98 | 0,00011 | 0,17 | 0,27 | 4849 | 2,7031 |
| 10 | 0 | 695 | 695 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Příloha D: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro zúžení 25-20

| Měření | Δp_{stat} | Qv | Qv | Qv ² | v ₂ | v ₁ | p _{DYN} | Re ₂ | Re ₁ | λ_2 | λ_1 | p _{tr2} | p _{tr1} | p _{tr} | Δp_m | ζ_1 | ζ_2 |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|-----------|-----------|
| | [Pa] | [m ³ hod ⁻¹] | [m ³ s ⁻¹] | [m ³ hod ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [Pa] | [1] | [1] | [1] | [1] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [1] | [1] |
| 1 | 16000 | 3,06 | 0,00085 | 9,364 | 3,340 | 5,219 | -8041,27 | 60125,20 | 75156,50 | 0,0202 | 0,0191 | 225,44 | 2602,69 | 2828,14 | 5130,60 | 0,92 | 0,38 |
| 2 | 15500 | 3,00 | 0,00083 | 9,000 | 3,275 | 5,117 | -7729,01 | 58946,28 | 73682,84 | 0,0203 | 0,0192 | 217,77 | 2514,04 | 2731,81 | 5039,18 | 0,94 | 0,38 |
| 3 | 14800 | 2,95 | 0,00082 | 8,703 | 3,220 | 5,032 | -7473,53 | 57963,84 | 72454,80 | 0,0204 | 0,0193 | 211,45 | 2441,18 | 2652,63 | 4673,84 | 0,90 | 0,37 |
| 4 | 14600 | 2,87 | 0,00080 | 8,237 | 3,133 | 4,895 | -7073,68 | 56391,94 | 70489,92 | 0,0205 | 0,0194 | 201,52 | 2326,50 | 2528,03 | 4998,29 | 1,02 | 0,42 |
| 5 | 12700 | 2,70 | 0,00075 | 7,290 | 2,947 | 4,605 | -6260,50 | 53051,65 | 66314,56 | 0,0208 | 0,0197 | 181,10 | 2090,73 | 2271,82 | 4167,67 | 0,96 | 0,39 |
| 6 | 11200 | 2,54 | 0,00071 | 6,452 | 2,773 | 4,332 | -5540,50 | 49907,85 | 62384,81 | 0,0212 | 0,0200 | 162,74 | 1878,75 | 2041,49 | 3618,01 | 0,94 | 0,39 |
| 7 | 9700 | 2,36 | 0,00066 | 5,570 | 2,576 | 4,025 | -4783,06 | 46371,07 | 57963,84 | 0,0216 | 0,0204 | 143,09 | 1651,99 | 1795,08 | 3121,86 | 0,94 | 0,39 |
| 8 | 8200 | 2,16 | 0,00060 | 4,666 | 2,358 | 3,684 | -4006,72 | 42441,32 | 53051,65 | 0,0220 | 0,0208 | 122,55 | 1414,83 | 1537,38 | 2655,90 | 0,96 | 0,39 |
| 9 | 7200 | 2,00 | 0,00056 | 4,000 | 2,183 | 3,411 | -3435,12 | 39297,52 | 49121,90 | 0,0225 | 0,0213 | 107,11 | 1236,55 | 1343,66 | 2421,22 | 1,02 | 0,42 |
| 10 | 5800 | 1,81 | 0,00050 | 3,276 | 1,976 | 3,087 | -2813,45 | 35564,25 | 44455,32 | 0,0230 | 0,0218 | 89,94 | 1038,36 | 1128,30 | 1858,25 | 0,95 | 0,39 |
| 11 | 4300 | 1,53 | 0,00043 | 2,341 | 1,670 | 2,610 | -2010,32 | 30062,60 | 37578,25 | 0,0240 | 0,0227 | 67,03 | 773,79 | 840,81 | 1448,87 | 1,04 | 0,43 |
| 12 | 2700 | 1,21 | 0,00034 | 1,464 | 1,321 | 2,064 | -1257,34 | 23775,00 | 29718,75 | 0,0255 | 0,0241 | 44,45 | 513,20 | 557,65 | 885,01 | 1,01 | 0,42 |
| 13 | 1500 | 0,88 | 0,00024 | 0,774 | 0,961 | 1,501 | -665,04 | 17290,91 | 21613,63 | 0,0276 | 0,0261 | 25,46 | 293,94 | 319,40 | 515,56 | 1,12 | 0,46 |
| 14 | 800 | 0,60 | 0,00017 | 0,360 | 0,655 | 1,023 | -309,16 | 11789,26 | 14736,57 | 0,0304 | 0,0287 | 13,03 | 150,37 | 163,40 | 327,44 | 1,53 | 0,63 |
| 15 | 350 | 0,00 | 0,00000 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 350 | 0 | 0 |

Příloha E: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro rozšíření 20-25

| Měření | h_1 | h_2 | p_1 | p_2 | Δp_{stat} | Q_v | Q_v | Q_v^2 | v_1 | v_2 | p_{DYN} |
|--------|-------|-------|---------|---------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| | [mm] | [mm] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [m ³ hod ⁻¹] | [m ³ s ⁻¹] | [m ³ hod ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [ms ⁻¹] | [Pa] |
| 1 | 75 | 175 | 735,75 | 1716,75 | 981,00 | 2,78 | 0,000772 | 7,73 | 4,74 | 3,03 | 6636,99 |
| 2 | 90 | 185 | 882,90 | 1814,85 | 931,95 | 2,74 | 0,000761 | 7,51 | 4,67 | 2,99 | 6447,37 |
| 3 | 115 | 210 | 1128,15 | 2060,10 | 931,95 | 2,66 | 0,000739 | 7,08 | 4,54 | 2,90 | 6076,38 |
| 4 | 160 | 240 | 1569,60 | 2354,40 | 784,80 | 2,46 | 0,000683 | 6,05 | 4,20 | 2,69 | 5196,99 |
| 5 | 185 | 260 | 1814,85 | 2550,60 | 735,75 | 2,35 | 0,000653 | 5,52 | 4,01 | 2,57 | 4742,61 |
| 6 | 245 | 305 | 2403,45 | 2992,05 | 588,60 | 2,07 | 0,000575 | 4,28 | 3,53 | 2,26 | 3679,78 |
| 7 | 275 | 330 | 2697,75 | 3237,30 | 539,55 | 1,92 | 0,000533 | 3,69 | 3,27 | 2,10 | 3165,80 |
| 8 | 330 | 375 | 3237,30 | 3678,75 | 441,45 | 1,69 | 0,000469 | 2,86 | 2,88 | 1,84 | 2452,76 |
| 9 | 355 | 390 | 3482,55 | 3825,90 | 343,35 | 1,48 | 0,000411 | 2,19 | 2,52 | 1,62 | 1881,07 |
| 10 | 390 | 410 | 3825,90 | 4022,10 | 196,20 | 1,04 | 0,000289 | 1,08 | 1,77 | 1,14 | 928,86 |
| 11 | 405 | 410 | 3973,05 | 4022,10 | 49,05 | 0,4 | 0,000111 | 0,16 | 0,68 | 0,44 | 137,40 |
| 12 | 410 | 410 | 4022,10 | 4022,10 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |

| Re_1 | Re_2 | λ_1 | λ_2 | $p_{\text{ř1}}$ | $p_{\text{ř2}}$ | $p_{\text{ř}}$ | Δp_m | ζ_1 | ζ_2 |
|----------|----------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------|-----------|-----------|
| [1] | [1] | [1] | [1] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [1] | [1] |
| 68279,44 | 43698,84 | 0,01957 | 0,02188 | 440,07 | 1007,64 | 1447,70 | 6170,29 | 0,55 | 1,34 |
| 67297,00 | 43070,08 | 0,01964 | 0,02196 | 429,05 | 982,40 | 1411,45 | 5967,87 | 0,55 | 1,33 |
| 65332,12 | 41812,56 | 0,01979 | 0,02213 | 407,36 | 932,76 | 1340,12 | 5668,21 | 0,55 | 1,34 |
| 60419,93 | 38668,76 | 0,02018 | 0,02256 | 355,29 | 813,51 | 1168,79 | 4813,00 | 0,55 | 1,33 |
| 57718,23 | 36939,67 | 0,02041 | 0,02282 | 327,95 | 750,92 | 1078,87 | 4399,49 | 0,55 | 1,34 |
| 50841,16 | 32538,34 | 0,02107 | 0,02356 | 262,66 | 601,41 | 864,07 | 3404,31 | 0,55 | 1,33 |
| 47157,02 | 30180,49 | 0,02147 | 0,02401 | 230,26 | 527,23 | 757,49 | 2947,86 | 0,55 | 1,34 |
| 41508,00 | 26565,12 | 0,02217 | 0,02478 | 184,18 | 421,72 | 605,90 | 2288,31 | 0,55 | 1,34 |
| 36350,20 | 23264,13 | 0,02291 | 0,02562 | 146,02 | 334,34 | 480,35 | 1744,07 | 0,55 | 1,34 |
| 25543,39 | 16347,77 | 0,02503 | 0,02798 | 78,75 | 180,32 | 259,07 | 865,99 | 0,55 | 1,34 |
| 9824,38 | 6287,60 | 0,03178 | 0,03553 | 14,79 | 33,87 | 48,66 | 137,79 | 0,59 | 1,45 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |